

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS PERDAS REAIS NO CONSUMO DE
ENERGIA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UM SETOR
PILOTO NO MUNICÍPIO DE CAMPO GRANDE-MS**

Ricardo Santos Coutinho

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS PERDAS REAIS NO CONSUMO DE
ENERGIA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UM SETOR
PILOTO NO MUNICÍPIO DE CAMPO GRANDE-MS**

Ricardo Santos Coutinho

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para Conclusão do
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**Orientador
Prof. Dr. Peter Batista Cheung**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS PERDAS REAIS NO CONSUMO DE ENERGIA
DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UM SETOR PILOTO NO MUNICÍPIO DE
CAMPO GRANDE-MS**

RICARDO SANTOS COUTINHO

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II**

BANCA EXAMINADORA :

Prof. Dr. Peter B. Cheung
(Orientador)

Prof. Dr. Davide Franco
(Membro da Banca)

Prof. Dr. Péricles Alves Medeiros
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

Ao Senhor Jesus.

A Ti seja o louvor, a honra, a glória e o domínio pelo século dos séculos.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus por mais esta vitória.

A minha esposa Amanda pelo companheirismo e dedicação.

A minha filha Helena, presente dos céus, e alegria do meu viver.

Ao meu pai Juarez e a minha mãe Gracy pelo apoio e confiança. Sem vocês este trabalho não seria possível.

Ao professor Dr. Peter B. Cheung pelo incentivo, dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

Aos pesquisadores Narumi Abe e Paulo Alves pela colaboração.

Ao professor Dr. Péricles A. Medeiros por me ensinar a primeiro observar e somente depois tentar explicar.

Ao professor Dr. Davide Franco pela colaboração e conselhos.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC pela colaboração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica.

RESUMO

COUTINHO, R. S. Avaliação do impacto das perdas reais no consumo de energia do sistema de bombeamento de um setor piloto no município de Campo Grande-MS. Florianópolis, 2008, 54 p. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

As perdas de água estão presentes em todas as etapas de um sistema de abastecimento. No entanto, é na rede de distribuição que elas ocorrem com maior intensidade, tanto em número de vazamentos quanto em volume perdido, em virtude de sua extensão e condição de implantação. Estas perdas também alteram o consumo de energia dos conjuntos elevatórios, os quais são utilizados no processo de transmissão da água e responsáveis pela maior parte da energia consumida nos sistemas de abastecimento. Este trabalho avalia o impacto das perdas sobre o consumo de energia do sistema de bombeamento, a partir do modelo computacional construído no EPANET, de um setor piloto do sistema de abastecimento do município de Campo Grande – MS. Foram realizadas simulações de diferentes cenários de perdas reais, aplicadas em duas concepções de bombeamento: bombeamento para reservatório de distribuição (1) e bombeamento direto na rede (2). Os resultados mostraram que, para ambas as concepções, o consumo de energia aumenta à medida que ocorre um incremento nas perdas reais do sistema. Verificou-se, também, que o consumo de energia da concepção 1 foi maior do que o da concepção 2, para todos os cenários de perdas reais avaliados.

Palavras-Chave: Perdas reais, consumo de energia, simulação computacional.

ABSTRACT

COUTINHO, R. S. Evaluation of the impact in the real water loss at the energy consumption of the pumping system of a pilot realm in the city of Campo Grande – MS. Florianópolis, 2008, 54 p. Work of conclusion's course– Federal University of Santa Catarina, Florianópolis.

The leaks are present at all stages of one water supply system. However, they happen with greater intensity on the distribution network, both in number of leakages as in lost volume because of its extent and condition of deployment. These leaks also get interference in the energy consumption of the pump systems, which are used in the process of water transference and responsible for most of energy consumed in the water supply systems. This labor appraises the impact in the leaks on the energy use of the pumping system, from the computational model built in EPANET, of a pilot realm in the supplying system at the city of Campo Grande – MS. Some simulations of distinct scenes of real water losses were implemented in two conceptions of pumping: pumping to storage (1) and direct pumping in the network (2). The results demonstrated that to both conceptions the energy consumption increases as an increase in real system water losses. It was also ascertained that the energy use of the first conception was higher than the second one for all the scenes of real losses evaluated.

Keywords: real water losses, energy consumption, computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

4.1 – Exemplo de vazamento na saída de um reservatório de distribuição (a) e de fraude em hidrômetro (b).....	4
4.2 – Hipótese da distribuição das perdas de água em um sistema de abastecimento (ARAÚJO, 2005).....	5
4.3 – Índice de perdas de faturamento nos estados brasileiros (adaptado de SNIS, 2006).	7
4.4 – Esquema de um sistema de abastecimento de água.....	9
4.5 – Avaliação geral das perdas (adaptado de TARDELLI FILHO, 2006).....	9
4.6 – Linha de energia em um segmento de tubo com vazamento (COLOMBO e KARNEY, 2002).....	20
4.7 - Razão de energia em função da localização e magnitude das perdas, para $\eta = 1$ e $h_f = 0,5$ (COLOMBO e KARNEY, 2002).....	21
4.8 – Resposta do custo de energia à complexidade do sistema (COLOMBO e KARNEY, 2002).....	22
4.9 – Impacto das perdas no consumo de energia (WALSKI, 2004).	25
4.10 – Impacto relativo das perdas no consumo de energia (WALSKI, 2004).....	25
5.1 – Localização da área de estudo.	26
5.2 – Área de abrangência do setor (à direita) e foto da região (à esquerda).	27
5.3 – Reservatório de distribuição do setor.	27
5.4 – Concepção do abastecimento do setor.....	28
5.5 – Modelo do sistema de distribuição no EPANET.....	28
5.6 - Pontos de monitoramento da pressão.	29
5.7 – Hidrograma de saída do reservatório de distribuição.	30
5.8 – Nós do sistema atual associados a coeficientes de emissão.	31
5.9 – Concepção 1: Bombeamento para reservatório de distribuição.	33
5.10 – Controle da operação da bomba.	34
5.11 – Concepção 2: Bombeamento direto na rede de distribuição.	35
6.1 – Gráfico PRD x CE.....	38
6.2 – Curvas características das bombas.	39
6.3 – Potência consumida para diferentes cenários de perdas.	41
6.4 – Consumo de energia para diferentes cenários de perdas reais.....	42
6.5 – Impacto relativo das perdas reais no consumo de energia.	43
6.6 – Variação no consumo de energia decorrente da mudança do cenário de perdas reais da situação atual.	44
6.7 – Consumo específico de energia elétrica.	45

LISTA DE QUADROS

4.1 – Características gerais das perdas reais (adaptado de SILVA; CONEJO; MARCKA, 2004).....	8
4.2 – Matriz do balanço hídrico (adaptada de ALEGRE <i>et al.</i> , 2000)	10
4.3 – Ações operacionais de eficiência energética (GOMES, 2005).....	17
5.1 – Matriz do balanço hídrico aplicada ao sistema atual (volumes em m ³ /dia).	29

LISTA DE TABELAS

4.1 – Índice de perdas de faturamento médio dos prestadores de serviço participantes do SNIS em 2006, segundo abrangência e região geográfica (SNIS, 2006).....	6
6.1 – Balanço hídrico do sistema atual, para um dia típico de operação.....	37
6.2 – Relação entre CE e PRD.....	38
6.3 – Erro relativo médio das concepções de bombeamento avaliadas, em relação ao sistema original.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANC	Água Não Contabilizada
ANF	Água Não Faturada
AWWA	American Water Works Association
BRC	Bomba com Velocidade de Rotação Constante
BRV	Bomba com Velocidade de Rotação Variável
CEE	Consumo Específico de Energia
CEN	Consumo de Energia Normalizado
DTA	Documento Técnico de Apoio
EP	Extensão Parcial da Rede
EPA	Environmental Protection Agency
ET	Extensão Total da Rede
ETA	Estação de Tratamento de Água
ILB	Índice Linear Bruto de Perda
ILR	Índice Linear de Perda Real
IPD	Índice de Perda na Distribuição
IPF	Índice de Perda de Faturamento
IPL	Índice de Perda por Ligação
IVI	Índice de Vazamentos da Infra-Estrutura
IWA	International Water Association
LA	Número de ligações ativas
LE	Linha de Energia
MS	Mato Grosso do Sul
ND	Número de Dias
PMSS	Programa de Modernização do Setor Saneamento
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PRD	Índice de Perda Real na Distribuição
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VD	Volume Disponibilizado
VF	Volume Faturado
VFU	Volume Fisicamente Utilizado
VSP	Válvula Sustentadora de Pressão
VU	Volume Utilizado

LISTA SÍMBOLOS

a	Fração de perdas
A	Área (m^2)
C	Custo do consumo de energia (dólares)
C_d	Coeficiente de descarga
CE	Coeficiente do emissor ($\text{m}^{3-\alpha} / \text{s}$)
D	Diâmetro do tubo (m)
e_m	Eficiência do motor
e_p	Eficiência da bomba
E_d	Energia mecânica disponível na extremidade à jusante do tubo
E_s	Energia mecânica disponível na fonte
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Altura manométrica total
h_f	Perda de carga relativa
H_d	Carga hidráulica na extremidade de jusante do tubo (m)
H_f	Perda de carga (m)
H_{gw}	Carga hidráulica no solo circundante (m)
H_l	Carga hidráulica da tubulação (m)
H_s	Carga total fornecida ao ponto de montante do tubo (m)
L	Comprimento (m)
Pot	Potência (kW.h)
Q	Vazão (m^3/s , L/s)
Q_d	Vazão no interior da tubulação (m^3/s , L/s)
Q_L	Vazão da perda (m^3/s , L/s)
t	Tempo (horas)
x	Fração do comprimento L
α	Expoente do emissor
η	Rendimento ou eficiência

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo Geral	2
2.2	Objetivos Específicos	2
3.	JUSTIFICATIVA	3
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1	Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água	4
4.2	Avaliação das Perdas	8
4.3	Indicadores de Perdas	11
4.3.1	Indicadores Básicos de Desempenho	12
4.3.2	Indicadores Intermediários de Desempenho	13
4.3.3	Indicadores Avançados de Desempenho	14
4.4	Considerações Sobre a Utilização dos Indicadores	15
4.5	Eficiência energética no saneamento	15
4.5.1	Indicadores de eficiência energética	18
4.6	Relação entre perdas e consumo de energia	19
5.	METODOLOGIA	26
5.1	Diagnóstico das Perdas no Sistema de Distribuição	29
5.2	Cálculo do Indicador de Perdas Reais	31
5.3	Configurações de Bombeamento Avaliadas	32
5.3.1	Bombeamento para reservatório de distribuição	33
5.3.2	Bombeamento direto na rede de distribuição	34
5.4	Cálculo do Consumo de Energia e do Indicador de Desempenho Energético do Sistema	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.1	Diagnóstico de Perdas do Sistema Atual	37
6.2	Relação entre PRD e CE	37
6.3	Curvas Características dos Sistemas Elevatórios	39
6.4	Consumo de Energia	41
6.5	Indicadores de Desempenho Energético	45
7.	CONCLUSÕES	46
8.	RECOMENDAÇÕES	48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
---	-----------

APÊNDICES

A – Planialtimetria da área onde se localiza o setor.	52
---	-----------

B - Parâmetros utilizado nas simulações e coeficientes horários de multiplicação da demanda base.	53
---	-----------

C - Número dos nós do modelo.....	54
--	-----------

D – Características físicas dos nós do modelo.	55
--	-----------

E – Número das tubulações do modelo.	56
--	-----------

F – Características físicas das tubulações do modelo.....	57
--	-----------

G – Características físicas das concepções 1 e 2.....	58
--	-----------

ANEXO A – Definição das informações-chave utilizadas no cálculo de indicadores de perdas (SILVA; CONEJO; MARCKA, 2004).....	59
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

Antes de chegar aos domicílios, a água percorre um extenso caminho e passa por diversas etapas para adequar-se ao uso previsto. De uma forma simplificada, pode-se dizer que estas etapas compreendem a captação junto a um corpo hídrico, a adução até a estação de tratamento, a reservação e a distribuição à população.

Ao longo dessa trajetória, volumes de água são perdidos nas canalizações e órgãos acessórios, em virtude do estado de conservação do sistema, de operações de manutenção do próprio sistema e de ligações clandestinas. Tais volumes são chamados de perdas de água ou simplesmente perdas.

Do ponto de vista operacional, as perdas de água podem ser entendidas como todo volume de água não faturado. Elas englobam as perdas reais, que representam os volumes não consumidos, e as perdas aparentes, que correspondem aos volumes consumidos e não contabilizados. No Brasil, segundo dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), estas perdas são da ordem de 40%, chegando a 70% em algumas cidades do país (SNIS, 2006).

Neste trabalho, atenção especial é dada às perdas reais, cujas origens são vazamentos nas diversas etapas do sistema de abastecimento de água (captação, adução, tratamento, reservação e distribuição). Embora elas estejam presentes em todas as etapas do sistema de abastecimento, é nas redes de distribuição que elas ocorrem com maior intensidade.

Estes volumes de água perdidos em vazamentos carregam consigo os custos de seu tratamento, de mão-de-obra e de energia. Este último está associado principalmente aos conjuntos elevatórios que são utilizados no processo de transmissão da água, os quais são responsáveis pela maior parte do consumo energético dos sistemas de abastecimento.

Assim, diante da realidade de que parte da energia consumida pelo sistema é desperdiçada alimentando-se vazamentos, surge a seguinte questão: qual é o impacto das perdas de água no consumo de energia dos sistemas de bombeamento?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo principal avaliar o impacto das perdas reais (vazamentos) sobre o consumo de energia dos sistemas de bombeamento.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivo específico, pretende-se avaliar o impacto de diferentes cenários de perdas reais sobre o consumo de energia do conjunto elevatório para duas concepções distintas de bombeamento:

- Bombeamento para reservatório de distribuição;
- Bombeamento direto na rede.

Também pretende-se determinar, para cada cenário de perdas, das concepções de bombeamento propostas, os respectivos indicadores de perdas e de eficiência energética.

3. JUSTIFICATIVA

Embora haja um consenso de que as perdas em sistemas de distribuição promovam um maior consumo de energia, uma abordagem direta e mais aprofundada do assunto é relativamente escassa e aparentemente recente (COLOMBO e KARNEY, 2002, 2005). Assim este trabalho tem por finalidade contribuir para o melhor entendimento da relação entre perdas e consumo de energia, e fornecer informações que auxiliem as companhias de saneamento no gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água.

O tema é de extrema relevância, uma vez que a conta de energia elétrica representa o segundo item das despesas das companhias de saneamento (DUARTE *et al.*, 2008; GOMES, 2005; OTERO *et al.* 2005; TSUTIYA e DAVID, 2005) e, portanto, ações voltadas à redução das perdas podem significar uma economia substancial de recursos financeiros, os quais poderão ser aplicados na melhoria da qualidade dos serviços prestados (controle e operação) e no aumento da cobertura de atendimento à população.

Além disso, a existência de programas de governo que estimulam e apóiam ações de combate e controle às perdas e de conservação de energia elétrica, como o Programa de Modernização do Setor Saneamento (PMSS), o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA) e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Saneamento (PROCEL SANEAR), ligados ao Ministério das Cidades e Eletrobrás, têm estimulado órgãos financiadores a exigirem planos e ações de conservação de água e energia para a liberação de recursos.

A realização deste trabalho também se justifica sob a ótica ambiental e social, uma vez que os volumes de água e a energia, desperdiçados em vazamentos, carregam consigo todos os gastos e externalidades associados à produção e transmissão da água tratada e da energia elétrica, como a depleção de recursos naturais, os custos do tratamento da água (produtos químicos, transporte, mão-de-obra, etc), emissão de gases de estufa e outros poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis, além de contribuírem para a escassez de água em áreas urbanas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água

Para Silva; Conejo; Marcka (2004), do ponto de vista operacional, as perdas de água podem ser consideradas como os volumes não contabilizados pelas companhias prestadoras de serviço de abastecimento de água. Estes volumes englobam as chamadas perdas reais (físicas) e aparentes (não-físicas).

A *International Water Association* (IWA) define as perdas reais como o volume de água produzido que não chega ao consumidor final devido à ocorrência de vazamentos nas adutoras, redes de distribuição e reservatórios (figura 4.1, a), bem como de extravasamentos em reservatórios setoriais. Enquanto que as perdas aparentes são definidas como o volume de água consumido, mas não contabilizado pelo prestador de serviço, decorrente de erros de medição nos hidrômetros e demais tipos de medidores, fraudes (figura 4.1, b), ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial (TARDELLI FILHO, 2006). A figura 4.2 apresenta um organograma da distribuição destas perdas em um sistema de abastecimento, segundo estimativas da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

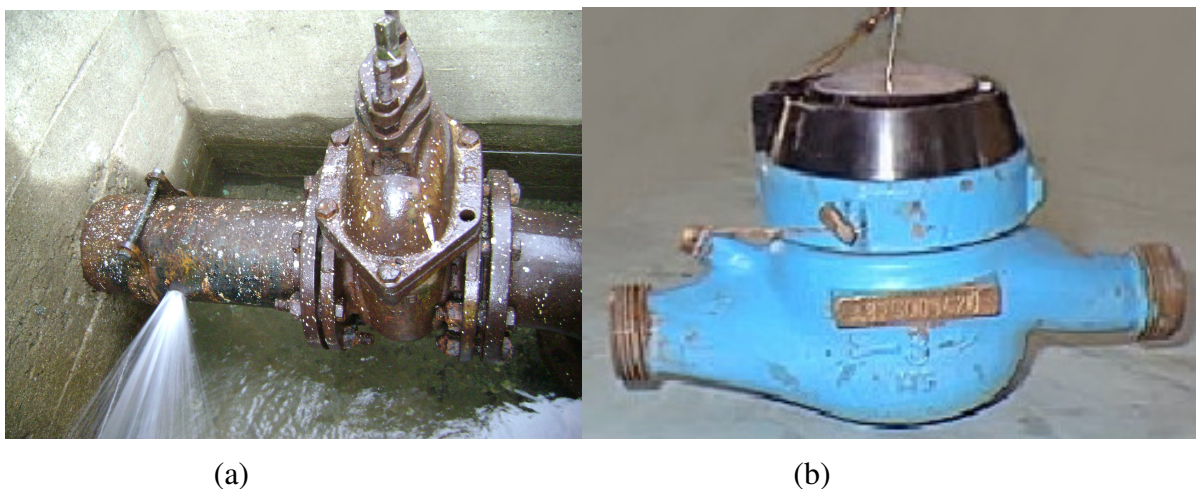


FIGURA 4.1 – Exemplo de vazamento na saída de um reservatório de distribuição (a) e de fraude em hidrômetro (b).

Fonte: Arquivo do autor (a) e Gonçalves e Itonaga (2007).

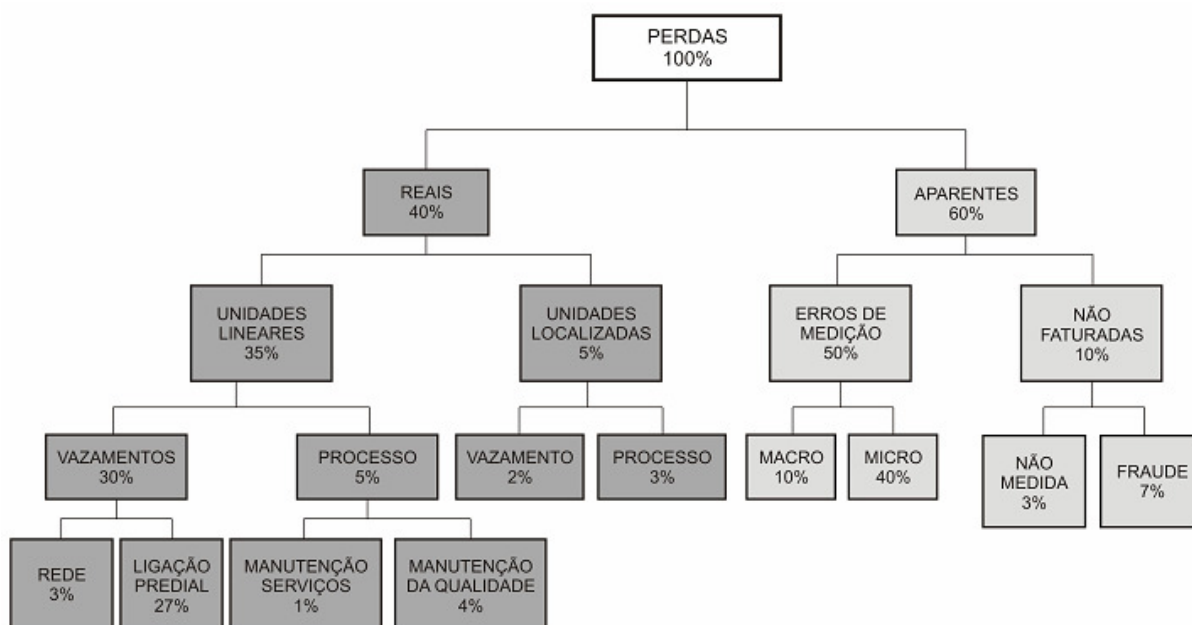


FIGURA 4.2 – Hipótese da distribuição das perdas de água em um sistema de abastecimento (ARAÚJO, 2005).

Segundo Colombo e Karney (2005), o interesse em estudar as perdas tem sua origem no desejo das prestadoras de serviço de saneamento em limitar a perda de receita decorrente dos volumes desperdiçados, e proporcional a este interesse, as pesquisas relacionadas ao tema têm tradicionalmente focalizado a quantificação da água perdida e a detecção de vazamentos.

No Brasil, somente a partir de 1997 é que o tema se tornou mais relevante, com a criação do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água – PNCDA – desenvolvido pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades. De maneira específica, “o Programa define e implementa ações e instrumentos tecnológicos, normativos, econômicos e institucionais com vistas a uma efetiva economia dos volumes de água demandados nas áreas urbanas” (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005).

Embora algumas iniciativas institucionais, realizadas em âmbito nacional, de combate e controle das perdas de água em sistemas de abastecimento já existam a mais de 10 anos, tais como o Programa de Modernização do Setor Saneamento (PMSS) e o anteriormente citado PNCDA, ambos ligados a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades, o cenário brasileiro ainda é bastante preocupante. Segundo dados do SNIS, referentes ao ano-base de 2006, a média nacional do índice de perdas de faturamento é de 39,8% , com médias regionais variando de 58,1% no Norte a 29,7% no Sul.

A tabela 4.1 apresenta o índice de perdas de faturamento médio de prestadores de serviço de saneamento, referente ao ano-base 2006, por região geográfica e segundo a sua abrangência. No enquadramento adotado pelo SNIS, os prestadores de abrangência regional são aqueles que atendem a vários municípios com sistemas isolados ou integrados, e compreendem principalmente pelas companhias estaduais. Já os de abrangência microrregional atendem a mais de um município, com sistemas isolados ou integrados, normalmente adjacentes e agrupados em uma pequena quantidade, e compreendem os consórcios intermunicipais. E os prestadores de abrangência local são aqueles que administram os serviços e operam o sistema do município em que estão sediados e, eventualmente, a frações do município adjacente; são representados pelas companhias municipais (públicas ou privadas).

A figura 4.3 apresenta o índice de perdas de faturamento para o conjunto de prestadores participantes do SNIS em 2006, distribuídos por faixas percentuais segundo os estados brasileiros.

TABELA 4.1 – Índice de perdas de faturamento médio dos prestadores de serviço participantes do SNIS em 2006, segundo abrangência e região geográfica (SNIS, 2006).

Regiões	Abrangência			Brasil
	Regional	Microrregional	Local	
	%	%	%	
Norte	53,4	-	63,3	58,1
Nordeste	45,1	19,5	34,4	44,1
Sudeste	39,8	42,6	37,9	39,3
Sul	26,6	13,9	38,1	29,7
Centro-Oeste	32,9	31,7	41,8	36,0
Brasil	39,5	38,6	40,7	39,8

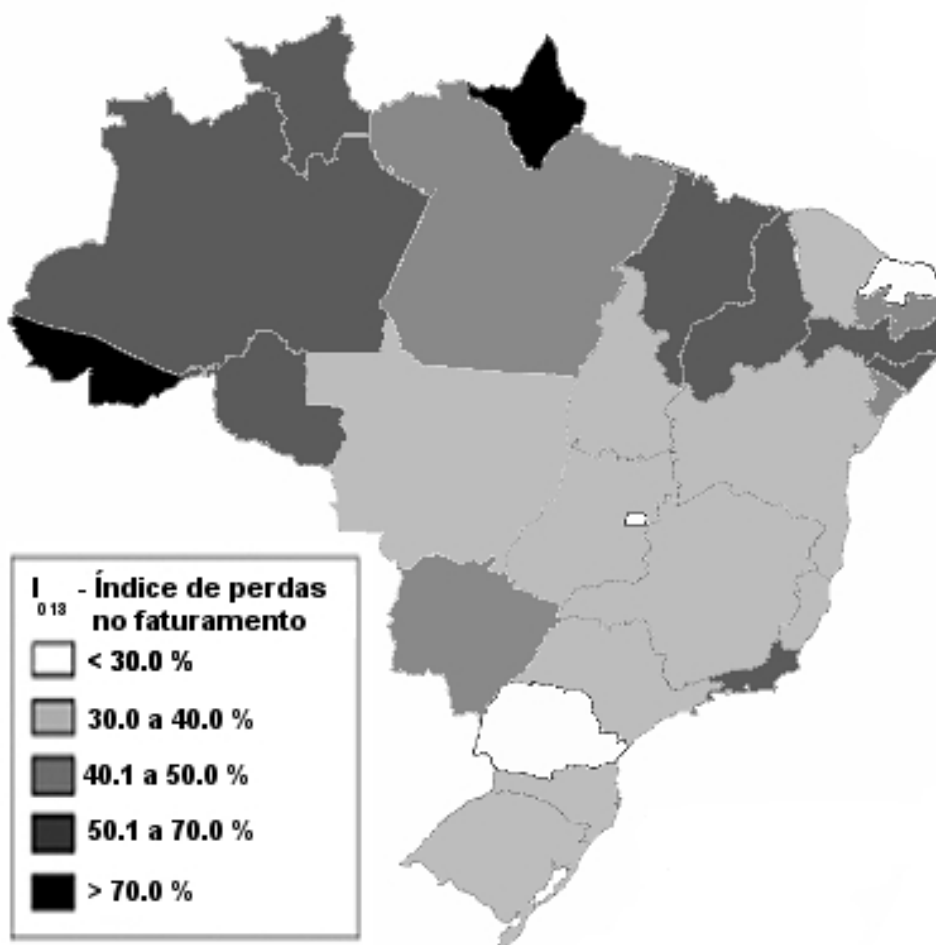


FIGURA 4.3 – Índice de perdas de faturamento nos estados brasileiros (adaptado de SNIS, 2006).

Miranda (2007) apresenta uma estimativa, em termos financeiros, dos custos associados às perdas de água nos sistemas de abastecimento do país. Segundo ele, estas perdas corresponderiam a aproximadamente R\$ 2,5 bilhões ao ano, o que representa um valor extremamente alto, uma vez que para alcançar a universalização dos serviços de água e esgotos no Brasil, seriam necessários investimentos da ordem de R\$ 10 bilhões ao ano, pelos próximos 20 anos.

Estes custos estão associados à produção e transporte da água tratada, e englobam principalmente os gastos com energia elétrica, produtos químicos e mão-de-obra (TARDELLI FILHO, 2006). E em se tratando de perdas reais, ou seja, dos volumes efetivamente perdidos em vazamentos, além do impacto econômico, a sua ocorrência pode comprometer a qualidade da água ao permitir a entrada de águas poluídas na tubulação (COLOMBO e KARNEY, 2002; TARDELLI FILHO, 2006).

A depleção de recursos naturais é outra consequência associada aos vazamentos, uma vez que para compensar o aumento que eles provocam na demanda do sistema, muitas vezes é

necessário explorar ou ampliar a captação de água, resultando em impactos ambientais que poderiam ser evitados pelo combate e controle dos vazamentos nos sistemas de abastecimento. Reis *et al.* (1997) também aponta que os vazamentos, quando associados a um aumento populacional, podem contribuir para a escassez de água em áreas urbanas.

Desta forma a avaliação das perdas reais de um sistema, bem como a adoção de medidas de combate e controle de vazamentos, requer o conhecimento de suas características, as quais são mostradas no quadro 4.1.

QUADRO 4.1 – Características gerais das perdas reais (adaptado de SILVA; CONEJO; MARCKA, 2004).

Etapas do sistema de abastecimento de água	Origem da perda	Magnitude
Adução de água bruta	Vazamentos nas tubulações	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Limpeza do poço de sucção	
Tratamento de água	Vazamentos estruturais	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional
	Lavagem de filtros	
	Descarga de lodo	
Reservação	Vazamentos estruturais	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Extravazamentos	
	Limpeza de reservatórios	
Adução de água tratada	Vazamentos nas tubulações	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Limpeza do poço de sucção	
	Descargas	
Distribuição (rede)	Vazamentos na rede	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões
	Vazamentos em ramais	
	Descargas	

4.2 Avaliação das Perdas

As perdas ocorrem em todas as etapas de um sistema de abastecimento (figura 4.4), ou seja, estão presentes na captação e adução de água bruta, no tratamento, na adução e reservação de água tratada e na distribuição (redes e ramais). Em geral, elas podem ser avaliadas como a diferença entre as vazões ou volumes medidos no ponto inicial e final de uma fase.

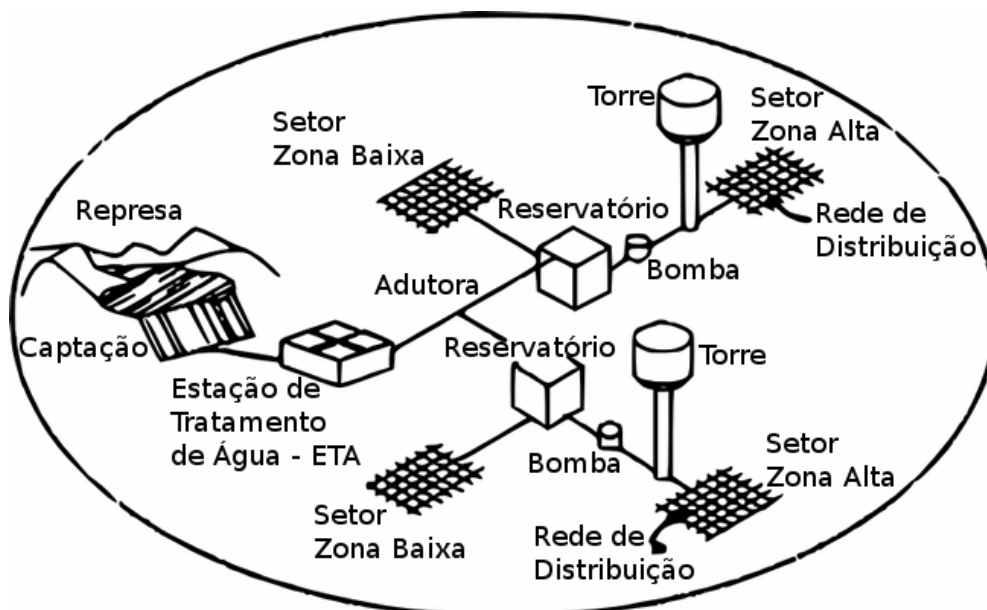


FIGURA 4.4 – Esquema de um sistema de abastecimento de água.

Em sistemas de abastecimento é comum a determinação das perdas a partir da estação de tratamento de água (ETA). Nesse caso mede-se o volume de água que sai da ETA (volume macromedido) em um determinado período de tempo (mês, ano, etc) e compara-se com a soma de todos os volumes medidos (ou estimados) na rede de distribuição (volume micromedido), no mesmo período. A diferença entre a macromedição (saída da ETA) e a micromedição (pontos de entrega ao consumidor final) corresponde à perda total do sistema, a qual engloba as parcelas de perdas reais e aparentes. A figura 4.5 ilustra, simplificadamente, a avaliação das perdas em um sistema de abastecimento, a partir dos volumes produzidos na ETA.

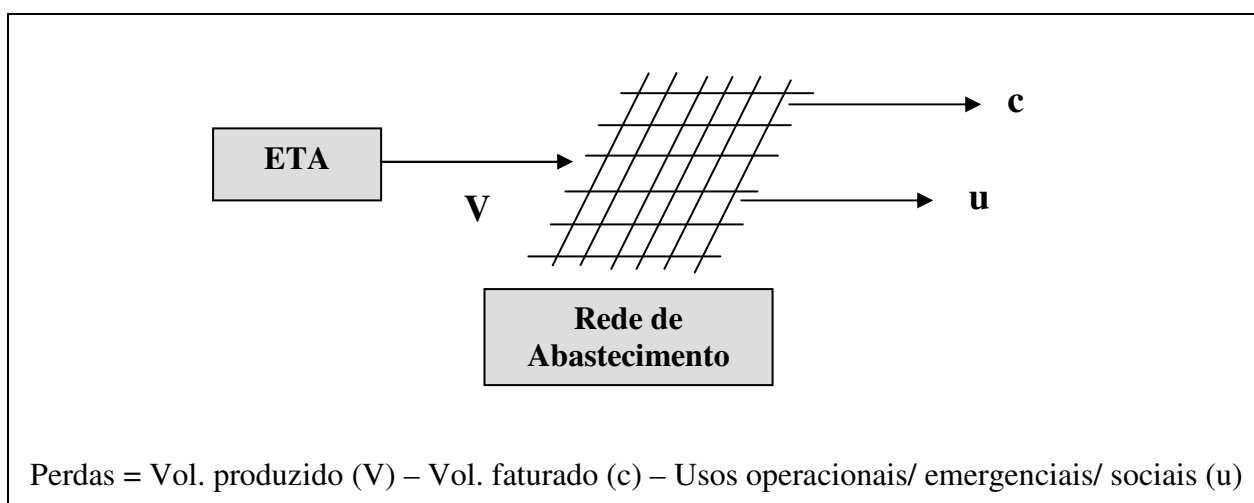


FIGURA 4.5 – Avaliação geral das perdas (adaptado de TARDELLI FILHO, 2006)

Já uma representação e quantificação mais detalhada do fluxo e uso da água no sistema pode ser obtida a partir da matriz do balanço hídrico proposta pela IWA (ALEGRE *et al.*, 2000), a qual é mostrada no quadro 4.2. Essa matriz representa o sistema de abastecimento a partir da “Água que Entra no Sistema”, que pode ser a captação, a ETA, um reservatório, e é estruturada em função do sistema, ou parte do sistema que se pretende avaliar. Segundo Tardelli Filho (2006), a matriz do balanço hídrico constitui-se como uma importante ferramenta de gestão, pois a partir dela podem ser gerados indicadores de desempenho para o acompanhamento das ações técnicas, operacionais e empresariais.

QUADRO 4.2 – Matriz do balanço hídrico (adaptada de ALEGRE *et al.*, 2000)

Água que entra no sistema (Volume Disponibilizado)	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (inclui água exportada)	Volume Faturado	Volume Utilizado
			Consumo faturado não medido (estimados)		
		Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão-pipa,etc)	Volume não Faturado	
			Consumo não faturado não medido (combate a incêndios, favelas, etc)		
	Perdas de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado (fraudes e falhas no cadastro)		
			Erros de medição (macro e micromedição)		
		Perdas reais	Perdas reais nas tubulações de água bruta e no tratamento (quando aplicável)		
			Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição		
			Vazamentos e extravazamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição		
			Vazamentos nos ramais (a montante do ponto de medição)		
				Vazamentos	

4.3 Indicadores de Perdas

Os indicadores são a base para o planejamento de programas de gerenciamento de perdas, pois possibilitam um diagnóstico das perdas em um sistema, auxiliam a tomada de ações de controle ou o redirecionamento destas, e permitem a comparação de desempenho (MIRANDA, 2002; TARDELLI FILHO, 2006).

Embora os indicadores sejam uma ferramenta importante na gestão das perdas de água, alguns fatores dificultam a sua escolha e utilização, dentre os quais destacam-se a grande quantidade de indicadores utilizados pelas entidades do setor, a falta de uma linguagem uniforme e a imprecisão dos dados empregados, ou seja, a confiabilidade dos dados obtidos são determinantes para que o indicador represente razoavelmente a realidade operacional de um sistema e possibilite a comparação do desempenho entre sistemas e prestadores de serviço (MIRANDA, 2002).

Gonçalves e Itonaga (2007) também observam que existe uma deficiência na padronização da fórmula de cálculo dos indicadores, bem como dos componentes que fazem parte dessa fórmula. Eles também chamam atenção para a necessidade de se fazer coincidir a periodicidade dos parâmetros utilizados, por exemplo, o período de leitura do volume disponibilizado pela ETA deve ser o mesmo da leitura do volume consumido na rede de distribuição. E apontam que muitos indicadores são afetados pelo tamanho do sistema, o que inviabiliza seu uso para comparação com outros sistemas.

Assim, com o objetivo de buscar um consenso a nível mundial, a IWA está apresentando, conceituando e discutindo uma série de indicadores relativos aos sistemas de abastecimento de água, onde se incluem os indicadores de perdas.

No Brasil, o PNCDA, em seu Documento Técnico de Apoio A2 (DTA A2), apresenta alguns indicadores organizados em três categorias, de acordo com a dificuldade de obtenção dos dados que os compõem e com o objetivo da avaliação que se pretende fazer. São elas: indicadores básicos de desempenho, indicadores intermediários de desempenho e indicadores avançados de desempenho. A seguir são apresentados os principais indicadores que integram cada uma destas categorias.

4.3.1 Indicadores Básicos de Desempenho

Os indicadores de nível básico são derivados de informações técnicas mínimas, exigíveis de todos os sistemas indistintamente, os quais fornecem uma síntese da eficiência e da eficácia do operador, e expressam as perdas do sistema em termos de perdas totais (MIRANDA, 2002; GONÇALVES E ITONAGA, 2007). Os principais indicadores básicos de desempenho mostrados a seguir são utilizados pelo SNIS. A definição das informações-chave utilizadas no cálculo destes indicadores encontram-se no anexo 1.

- **Índice de Perda na Distribuição (IPD) ou Água Não Contabilizada (ANC)**

Este indicador relaciona o volume disponibilizado ao volume utilizado, é expresso em termos percentuais, e calculado pela expressão 4.1. A água que é disponibilizada e não utilizada constitui uma parcela não contabilizada, que incorpora o conjunto das perdas reais e aparentes no subsistema de distribuição.

$$IPD = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Utilizado (VU)}}{\text{Volume Disponibilizado (VD)}} \times 100 \quad (4.1)$$

- **Índice de Perda de Faturamento (IPF) ou Água Não Faturada (ANF)**

Este indicador expressa a relação entre o volume disponibilizado e o volume faturado. É uma composição de perdas reais e aparentes que incorpora volumes utilizados não cobrados, como o volume especial e o volume operacional. Ele é calculado pela expressão 4.2, abaixo, e expresso em termos percentuais.

$$IPF = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Faturado (VF)}}{\text{Volume Disponibilizado (VD)}} \times 100 \quad (4.2)$$

- **Índice Linear Bruto de Perda (ILB)**

Este indicador relaciona a diferença entre volume disponibilizado e volume utilizado à extensão parcial da rede. Pode ser utilizado na comparação de desempenho de serviços, desde

que envolva fatores de confiabilidade compatíveis. As perdas expressas por este indicador incorporam perdas reais e aparentes. Este indicador difere do índice linear de perdas calculado no exterior, por não incluir os ramais prediais na extensão parcial da rede, o que na prática resulta em valores mais conservadores, uma vez que a extensão dos ramais prediais, somados, podem ser maiores que a magnitude da soma das adutoras, subadutoras e rede de distribuição. O indicador é calculado pela expressão 4.3, abaixo, e expresso em (L/dia) / km.

$$ILB = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Utilizado (VU)}}{\text{Extensão Parcial da Rede (EP)} \times \text{Número de Dias (ND)}} \times 100 \quad (4.3)$$

- **Índice de Perda por Ligação (IPL)**

É um indicador volumétrico de desempenho, mais preciso que os percentuais. Relaciona a diferença entre volume disponibilizado e volume utilizado ao número de ligações ativas. Pelo fato desta diferença de volume expressar uma parcela não desprezível de perdas aparentes, este indicador não deve ser utilizado em comparações com serviços estrangeiros sobre os quais se contam apenas as perdas reais. A expressão 4.4, abaixo, mostra como é calculado este indicador, o qual é expresso em (L/dia) / ligação.

$$IPL = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Utilizado (VU)}}{\text{Número de Ligações Ativas (LA)} \times \text{Número de Dias (ND)}} \times 100 \quad (4.4)$$

4.3.2 Indicadores Intermediários de Desempenho

Os indicadores intermediários de desempenho são derivados de informações técnicas específicas mais refinadas do que os indicadores básicos de desempenho, e permitem um conhecimento mais pormenorizado, para uma análise mais profunda (MIRANDA, 2002). Eles dizem respeito a um isolamento das perdas físicas e refinamento de sua localização específica nos sistemas (SILVA; CONEJO; MARCKA, 2004). Os principais indicadores intermediários de desempenho relacionados a condições operacionais são:

- **Índice de Perda Real na Distribuição (PRD)**

Relaciona o volume fisicamente utilizado (VFU) com o volume disponibilizado (VD), de forma análoga ao Índice de Perda na Distribuição (IPD), como mostra a expressão 4.5, abaixo.

$$PRD = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Fis. Utilizado (VFU)}}{\text{Volume Disponibilizado (VD)}} \times 100 \quad (4.5)$$

O volume fisicamente utilizado (VFU) é uma função do volume utilizado (VU) e incorpora os fatores de desvios sistemáticos de micromedição e macromedição, assim como os fatores estatísticos de confiabilidade aplicados sobre os consumos estimados. Maiores detalhes podem ser encontrados em Silva; Conejo; Marcka (2004, p.54-55).

- **Índice Linear de Perda Real (ILR)**

Reflete a diferença entre o volume distribuído (VD) e o volume fisicamente utilizado (VFU) distribuído pela extensão total da rede, a qual inclui adutoras, subadutoras, rede de distribuição e ramais prediais. É calculado pela expressão 4.6, abaixo, e expresso em (L/dia)/km.

$$ILR = \frac{\text{Volume Disponibilizado (VD)} - \text{Volume Fis.Utilizado (VFU)}}{\text{Extensão Total da Rede (ET)} \times \text{Número de Dias (ND)}} \times 100 \quad (4.6)$$

4.3.3 Indicadores Avançados de Desempenho

São indicadores derivados de informações técnicas que, adicionalmente aos atributos das anteriores (básicos e intermediários) envolvem um grande esforço de monitoramento e controle operacional, utilizando técnicas e equipamentos mais sofisticados. Eles oferecem um maior detalhe específico, relevantes para a gestão do operador. Miranda (2002) afirma que o indicador mais avançado da atualidade é o Índice de Vazamentos da Infra-Estrutura (IVI),

formulado por Lambert *et al.* (1999) e recomendado pela IWA. Ele é um número adimensional calculado pela expressão 4.7, abaixo:

$$IVI = \frac{\text{Volume de Perdas Reais Correntes Anuais}}{\text{Volume de Perdas Reais Inevitáveis}} \times 100 \quad (4.7)$$

Maiores informações sobre o cálculo deste indicador podem ser encontradas em Silva; Conejo; Marcka (2004, p.57).

4.4 Considerações Sobre a Utilização dos Indicadores

É desejável que o período de cálculo do indicador cubra toda a sazonalidade do processo, pois o comportamento do sistema de abastecimento pode apresentar grandes variações durante períodos distintos, como por exemplo, durante os meses de estiagem e de chuva (GONÇALVES E ITONAGA, 2007).

Embora ainda sejam muito utilizados pelas prestadoras de serviço de abastecimento de água no Brasil, os indicadores percentuais tem como grande desvantagem a dificuldade de comparação do desempenho entre sistemas. No entanto, podem ser úteis para a avaliação da evolução das perdas e do desempenho para um mesmo sistema de abastecimento. Miranda (2002) aponta que a tendência é adotar indicadores que incorporam os efeitos da pressão de operação, da extensão da rede e da quantidade de ligações, em detrimento dos indicadores de perdas em percentuais.

4.5 Eficiência energética no saneamento

Segundo James *et al.* (2002), a energia consumida no mundo para a distribuição de água é da ordem de 7% do total do consumo mundial, ou seja, é aproximadamente igual à quantidade total de energia usada no Japão e Taiwan, conjuntamente. Nos Estados Unidos o setor de água e energia consome, anualmente, 75 bilhões de kWh, que corresponde a 3% do total de energia consumida no país.

No Brasil, segundo o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Saneamento (PROCEL SANEAR, 2007), 2,5% do total de energia elétrica consumida no país, o equivalente a aproximadamente 9,3 bilhões de kW/ano, são consumidos por prestadores de serviço de água e esgoto. Os conjuntos motor-bomba respondem por cerca de 90% deste total (GOMES, 2005).

No Brasil, a tendência da demanda de energia elétrica do setor é aumentar à medida que os serviços de água e esgotamento sanitário se expandirem. Segundo Gomes (2005) este fato é observado com preocupação pelo setor energético, uma vez que o custo da energia elétrica nos sistemas de bombeamento tem se acentuado significativamente, constituindo-se o segundo item de despesas nas empresas prestadoras de serviço.

A Sabesp, por exemplo, maior empresa do setor no país, consome mensalmente cerca de 161 GWh de energia, o que representa uma despesa de 14 milhões de reais por mês e 15% dos custos totais da empresa (TSUTIYA e DAVID, 2005).

Gomes (2005) também chama a atenção para a perda significativa de energia nos sistemas de distribuição de água e esgotamento sanitário. Os desperdícios de energia elétrica são decorrentes de fatores como (GOMES, 2005; JAMES *et al.*, 2002):

- Formas contratuais indevidas;
- Procedimentos operacionais inadequados;
- Vazamentos nos reservatórios, redes de distribuição e ramais prediais;
- Mau dimensionamento dos sistemas;
- Equipamentos elétricos antigos e ultrapassados;
- Tecnologias mal utilizadas;
- Erros de concepção dos projetos;
- Manutenções precárias.

Para James *et al.* (2002) o consumo de energia, na maioria dos sistemas de abastecimento de todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, através de medidas de eficiência energética ou efficientização. A eficiência energética em sistemas de abastecimento pode ser entendida como ações físicas ou não-físicas que visam o uso otimizado da energia para satisfazer às necessidades de água.

Segundo Gomes (2005) as medidas de eficiência energética podem ser divididas em ações administrativas e operacionais. As administrativas, geralmente as primeiras a serem

tomadas, não envolvem custos de implantação e são relativas aos contratos existentes com as concessionárias de energia elétrica; podem ser resumidas em (GOMES, 2005):

- Correção da classe de faturamento;
- Regularização da demanda contratada;
- Alteração da estrutura tarifária;
- Desativação das instalações inutilizadas;
- Conferência da leitura da conta de energia elétrica;
- Acordos com companhias energéticas para a redução de tarifas.

As ações operacionais, normalmente implantadas em uma segunda etapa, dizem respeito às ações de engenharia e são apresentadas no quadro 4.3, abaixo.

QUADRO 4.3 – Ações operacionais de eficiência energética (GOMES, 2005).

Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência
	Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento dos conjuntos motor-bomba
	Redução das perdas de carga nas tubulações
	Melhoria do fator de carga nas instalações
	Redução do índice de perdas de água
	Uso racional da água
Controle operacional	Alteração no sistema de bombeamento - reservação
	Utilização de inversor de frequência
	Alteração nos procedimentos operacionais de ETA's
Automação do sistema de abastecimento de água	
Alternativas para geração de energia elétrica	Aproveitamento de potenciais energéticos
	Uso de geradores nos horários de ponta
Redução da altura manométrica	Redução de altura geométrica
	Redução das perdas de carga
Redução no volume de água distribuído	Controle de perdas de água
	Uso racional da água

Um programa eficaz de eficiência energética inclui um programa de combate e controle de perdas de água, pois estas estão relacionadas ao consumo de energia elétrica (TISUTIYA e DAVID, 2005). A *American Water Works Association* (AWWA) estima que 5 a 10 bilhões de kWh de energia gerada nos Estados Unidos é gasto anualmente com águas não faturadas (COLOMBO e KARNEY, 2005).

Toda essa energia desperdiçada alimentando-se vazamentos está associada à degradação ambiental provocada pela produção e consumo de energia, como a emissão de gases de estufa e outros poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis, chuvas ácidas e depleção de recursos naturais (COLOMBO e KARNEY, 2002; JAMES *et al.*, 2002).

Apesar da maioria das companhias de água do mundo destinarem pequena atenção à redução do uso de energia, devido em grande parte à falta de conhecimento e capacidade técnica dos gerentes destes sistemas, o aumento dos preços da energia e a diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos, associada ao aumento da população urbana e do número de ligações de água (atualmente somente a metade dos moradores das cidades tem ligação de água) constituem “um poderoso incentivo para perseguir o potencial de efficientização de água e energia” (JAMES *et al.*, 2002, p. 3).

4.5.1 Indicadores de eficiência energética

Segundo Otero et al, no Brasil, o consumo específico de energia (CEE) é um indicador amplamente utilizado no setor saneamento. Ele relaciona, para um determinado período de tempo, o consumo de energia do conjunto elevatório pelo volume bombeado pelo mesmo, sendo expresso pela equação 4.8, abaixo.

$$CEE = \frac{\text{Energia Consumida}}{\text{Volume Bombeado}} \left[\frac{kW.h}{m^3} \right] \quad (4.8)$$

Este indicador é útil para acompanhar a evolução do desempenho de uma mesma instalação de bombeamento, todavia, ele não é recomendado para comparar o desempenho de instalações de bombeamento distintas, pois não reflete o número de horas de funcionamento dos diferentes grupos elevatórios e nem a topologia do sistema de recalque.

Outro indicador é o consumo de energia normalizado (CEN), o qual é apresentado no documento *Performance Indicators for Water Supply Services*, publicado pela IWA, no ano 2000. Este indicador reduz as alturas manométricas (H) de diferentes instalações a uma altura única, de modo a permitir a comparação do desempenho destas, sendo definido como “a quantidade média de energia gasta para elevar 1 metro cúbico de água a 100 m de altura por

meio de instalações de bombeamento” (OTERO *et al.*, 2005). Este indicador é calculado pela expressão 4.9.

$$CEN = \frac{\text{Energia Consumida}}{\text{Volume Bombeado} \times (H / 100)} \left[\frac{kW.h}{m^3} \right] \quad (4.9)$$

4.6 Relação entre perdas e consumo de energia

Na discussão a seguir o termo perdas deve ser entendido como perdas reais, pois as perdas aparentes, se corrigidas ou minimizadas, não reduzem o consumo de energia elétrica, e sim a perda de faturamento da prestadora de serviço (ELETROBRÁS, 2005).

Colombo e Karney (2002) estabelecem relações entre os vazamentos e a energia através de cálculos elementares, baseando-se na fórmula da perda de carga de Darcy-Weisbach (eq. 4.10) e na função do orifício (eq. 4.11).

$$H_f = \frac{fLQ_d^2}{2gDA^2} \quad (4.10)$$

$$Q_L = C_d A [2g(H_l - H_{gw})]^\alpha \quad (4.11)$$

onde A é a área da seção transversal para a eq. 4.10 ou a área do orifício para a eq. 4.11; f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach; L é o comprimento (m) da tubulação; Q_d é a vazão no interior da tubulação; D é o diâmetro do tubo (m); H_l e H_{gw} são, respectivamente, as cargas hidráulicas da tubulação e do solo circundante; C_d é o coeficiente de descarga; α é o expoente do emissor; e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Todo o estudo é realizado em um segmento de tubo hipotético com um único vazamento concentrado a uma fração x do comprimento L do tubo, o qual é mostrado na figura 4.6. No estudo, os autores assumem que, tenha o sistema perdas ou não, a vazão através do orifício Q_L é compensada de modo que são atendidos os requisitos de vazão Q_d e pressão

H_d da extremidade à jusante, ou seja, as perdas no sistema são avaliadas garantindo-se um nível de serviço equivalente.

Na figura 4.6, abaixo, a variação da linha de energia (LE) do seguimento de tubo, provocada pelo vazamento, pode ser considerada como a representação gráfica do impacto das perdas sobre o consumo de energia.

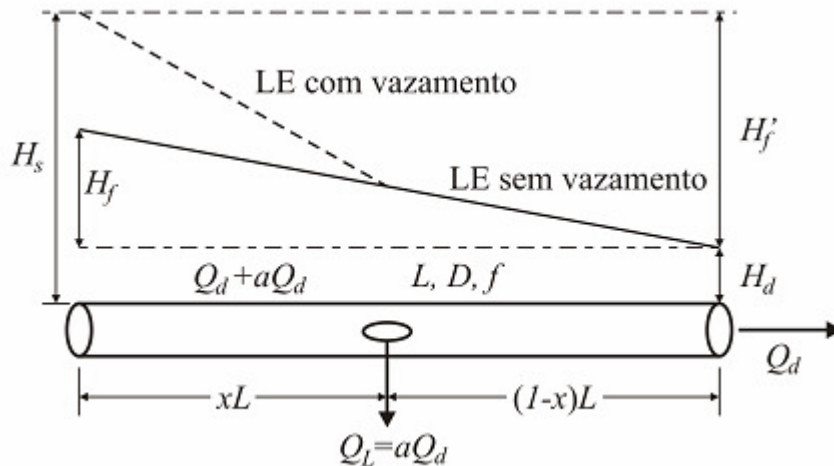


FIGURA 4.6 – Linha de energia em um segmento de tubo com vazamento (COLOMBO e KARNEY, 2002)

O tubo possui diâmetro D , fator de atrito de Darcy-Weisbach f , e um vazamento situado em xL . A carga total H_s fornecida ao ponto de montante deve coincidir com o início da linha de energia (LE) modificada para que a pressão H_d no extremo de jusante seja mantida, ou seja, a presença de vazamentos requer do sistema uma maior energia à montante para atender a mesma demanda.

A vazão da perda Q_L pode ser expressa como uma fração da demanda aQ_d , onde a é a fração de perdas, ou pode ser modelada usando uma função de orifício na forma mostrada na eq. 4.11 ou na forma da eq. 4.12 proposta por Rossman (2000).

$$Q_L = CE.H^\alpha \quad (4.12)$$

onde CE é o coeficiente do emissor ($m^{3-\alpha} / s$); H é a carga hidráulica no emissor (m); e α é o expoente do emissor.

A partir das equações 4.10, 4.11, e 4.12, e de relações geométricas tiradas da figura 4.6, Colombo e Karney (2002) apresentam uma expressão que permite avaliar a eficiência energética em um tubo com perda (eq. 4.13).

$$\frac{E_d}{E_s} = \frac{\eta}{(1+a)\{1+[xa(a+2)+1]h_f\}} \quad (4.13)$$

Onde E_d e E_s são, respectivamente, a energia mecânica disponível na extremidade à jusante do tubo e a fornecida na fonte, η é um fator empírico de eficiência, a é a fração de perdas, x é a fração do comprimento e h_f é a perda de carga relativa (H_f/H_d).

A diferença entre E_d e E_s corresponde à energia consumida pelo vazamento. A figura 4.7 mostra a eficiência energética do tubo com vazamentos, expressa como uma quantidade adimensional dada pela relação dos termos de energia (E_d/E_s), em função da fração de perdas a , em diferentes posições (COLOMBO e KARNEY, 2002).

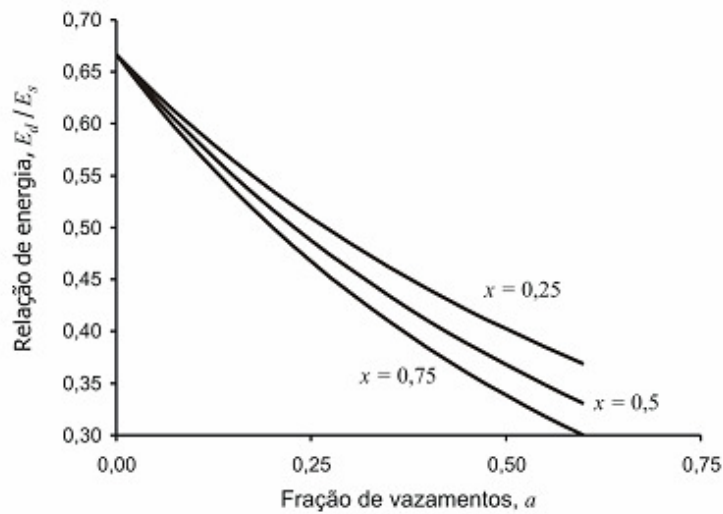


FIGURA 4.7 - Razão de energia em função da localização e magnitude das perdas, para $\eta = 1$ e $h_f = 0,5$ (COLOMBO e KARNEY, 2002).

O gráfico da figura 4.7 mostra, para este caso, que quanto maior a fração de perdas a menor é a relação de energia, ou seja, maior é a energia consumida pela perda. Também indica, para a situação em questão, que quanto mais distante da fonte se localizar o vazamento, ou seja, quanto mais à jusante, maior é o impacto no consumo de energia. Para Colombo e Karney (2002), embora uma extrapolação deste resultado analítico não seja viável

para redes de distribuição, pode-se esperar que perdas situadas em regiões mais à jusante da rede geralmente envolverão um maior custo de energia, pois uma maior vazão deve ser transmitida através de maiores porções do sistema.

No mesmo trabalho, ao analisar como a complexidade dos sistemas influencia a relação entre perdas e consumo de energia, Colombo e Karney (2002) encontraram que a curva do aumento do consumo de energia, para cinco sistemas com características diferentes (Walski #1, Walski #2, um único tubo, rede com dois anéis, e rede com 10 anéis), varia mais do que linearmente com o aumento das perdas, ajustando-se com precisão a uma família de funções polinomiais de segunda ordem do tipo $ay^2 + by$ (figura 4.8).

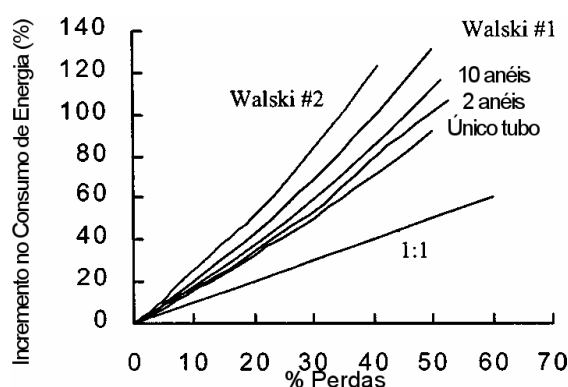


FIGURA 4.8 – Resposta do custo de energia à complexidade do sistema (COLOMBO e KARNEY, 2002).

Para Walski (2004), os custos de energia devem ser analisados focalizando-se o impacto das perdas sobre as bombas, onde de fato a energia é consumida. Para isso, segundo ele, é necessário verificar quais termos da equação do custo de bombeamento (eq. 4.14) são afetados pelas perdas. O autor também aponta que os resultados são diferentes para os seguintes casos considerados: bombeamento para um reservatório, e bombeamento para uma zona sem reservatório.

No caso em que as bombas alimentam uma zona de pressão com reservatório (situação típica de diversos sistemas de distribuição de água), a vazão, a altura manométrica e a eficiência permanecem praticamente constante ao longo do dia, e o custo de bombeamento é dado pela eq. (4.14) (WALSKI, 2004):

$$C = \frac{1,019Qht}{e_m e_p} \quad (4.14)$$

onde C é o custo do consumo de energia no tempo t (dólares), Q é a vazão (L/s); h é a altura manométrica total da bomba (m); t é a duração do bombeamento (horas); e_m é a eficiência do motor (%), e e_p é a eficiência da bomba (%).

Como o ponto de funcionamento de uma bomba, em uma zona com reservatório, é essencialmente constante, o único termo afetado pelas perdas é o tempo. Assim, um aumento nas perdas resulta em maior tempo de funcionamento da bomba ao longo do dia. Como a vazão é basicamente constante, o tempo de operação da bomba será proporcional ao volume total necessário do dia. Desta maneira, um aumento de 20% nas perdas deveria resultar em um aumento de aproximadamente 20% no custo. Entretanto, o consumo de energia não é perfeitamente linear, pois o ponto de funcionamento da bomba desloca-se levemente com as mudanças da demanda e nível do tanque ao longo do dia (WALSKI, 2004). Além disso, o custo de energia elétrica pode variar ao longo do dia, segundo a estrutura tarifária praticada no país ou região.

Walski (2004) também aponta que muitos sistemas possuem várias zonas de pressão, onde várias elevatórias operam com diferentes valores de altura manométrica e eficiência, e que a energia total depende da altura manométrica total, consideradas todas as bombas pela qual a água é recalçada. A implicação deste fato, segundo o autor, é uma maior economia de energia, para a mesma redução de perdas, em zonas de alta pressão do que para as de baixa pressão.

Outra situação comumente encontrada em sistemas de abastecimento é o bombeamento para uma zona de pressão fechada sem reservatório. Neste caso, a bomba deve satisfazer todas as demandas, incluindo as perdas, e seu ponto de funcionamento pode mudar radicalmente ao longo do dia. Assim, a eq. 4.14 é modificada resultando na eq. 4.15 (WALSKI, 2004):

$$C = \int_0^T \frac{1,019 Q h}{e_m e_p} dt \quad (4.15)$$

Neste caso, a vazão, a altura manométrica, e a eficiência podem variar com o tempo, embora a vazão total bombeada seja essencialmente a mesma. Quando as perdas aumentam, a eficiência geralmente melhora, pois bombas em sistemas fechados tendem a operar a esquerda (menor Q) do ponto ótimo (de melhor eficiência) da bomba (WALSKI, 2004).

Segundo Walski (2004), o efeito das perdas na altura manométrica depende se a bomba é de rotação constante ou variável. Na primeira, a altura manométrica diminui com o deslocamento à direita do ponto de operação devido às perdas. Já na segunda, a velocidade de rotação aumenta com o aumento da demanda, permanecendo a altura manométrica praticamente constante. Em ambos os casos, o autor aponta que o custo de bombeamento aumenta menos do que proporcionalmente com o aumento de energia.

Para ilustrar os casos considerados acima, Walski (2004) utilizou um modelo representativo de um sistema real, com uma única zona de pressão, vazão de $1,7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{dia}$ e 68 nós. A simulação foi feita no software WaterCAD. Foram aplicados três coeficientes de emissão (100, 200, 300 L/dia/m^{1/2}) em todos os nós do sistema para simular diferentes níveis de perdas. Os custos diários de operação das bombas foram determinados para três situações:

- Bombas de rotação constante em um sistema com reservatório (BRC com Res.);
- Bomba de rotação constante em um sistema fechado sem reservatório (BRC sem Res.);
- Bomba de rotação variável em um sistema fechado sem reservatório (BRV sem Res.).

Os resultados são mostrados na figura 4.9 em kilowatts/dia de energia consumida, e na figura 4.10 em termos de incremento (%) dos custos de energia para um aumento (%) nas perdas (WALSKI, 2004).

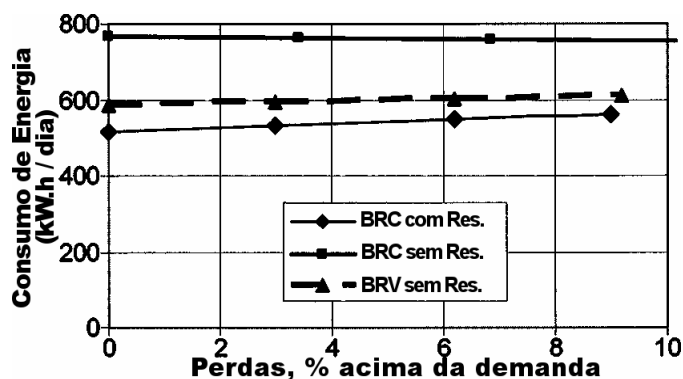


FIGURA 4.9 – Impacto das perdas no consumo de energia (WALSKI, 2004).

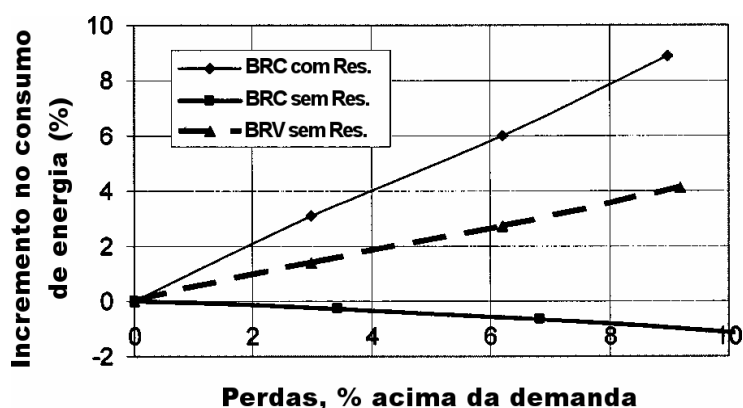


FIGURA 4.10 – Impacto relativo das perdas no consumo de energia (WALSKI, 2004).

Diferentemente dos resultados apresentados por Colombo e Karney (2002) na figura 4.8, a figura 4.10 apresentada por Walski (2004) mostra que a resposta do consumo de energia às perdas varia amplamente com a operação, mas em nenhum dos casos ela é maior do que a proporcional. Para o bombeamento em um sistema com reservatório, a despesa extra de energia varia quase que linearmente, enquanto que na situação com bombas de rotação variável, os custos variam menos que linearmente, pois as perdas tendem a mover o ponto de funcionamento da bomba para um ponto mais eficiente, em sua curva (WALSKI, 2004).

Quanto à utilização de bomba com rotação constante, a figura 4.10 mostra, para este exemplo, que a existência de perdas reduz o consumo de energia. Isto ocorre porque as perdas têm o efeito de reduzir a altura manométrica da bomba e aumentar sua eficiência quando da compensação da vazão. Walski (2004) afirma que este nem sempre é o caso, e que a inter-relação entre vazão, altura manométrica e eficiência não pode ser determinada sem uma análise cuidadosa do modelo.

5. METODOLOGIA

Este estudo foi realizado no Laboratório de Redes de Saneamento da Universidade Federal de Santa Catarina (RESAN-UFSC) em parceria com pesquisadores da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Para avaliar a relação entre as perdas reais e o consumo de energia dos sistemas elevatórios, utilizou-se o modelo computacional de um setor piloto do sistema de distribuição de água do município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul (figura 5.1). Este setor foi escolhido por ser isolado do restante do sistema de distribuição do município e por apresentar, atualmente, pontos de monitoramento de pressão e vazão, cujos dados medidos possibilitaram a calibração do modelo de forma que o mesmo representasse, aproximadamente, a operação real do sistema.

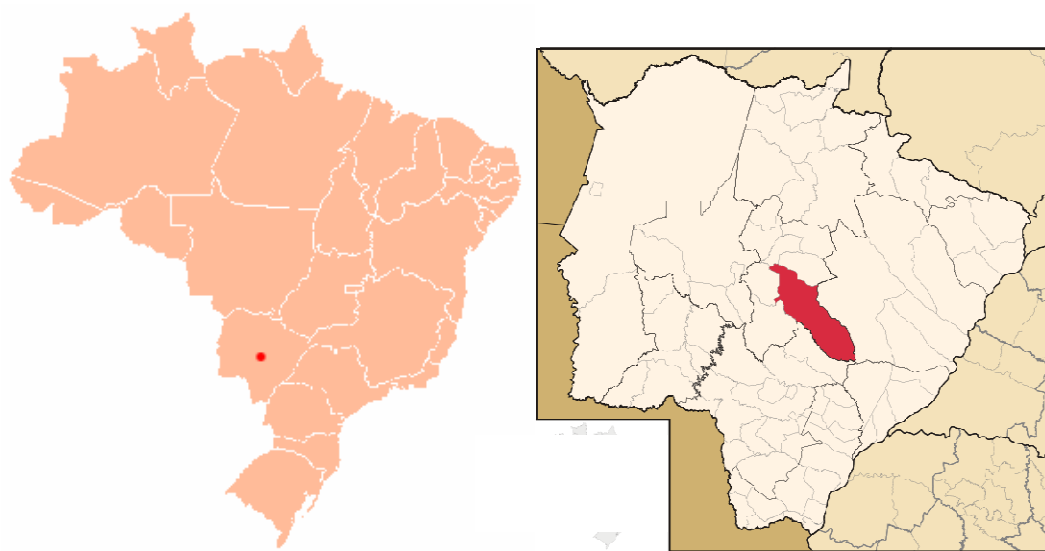


FIGURA 5.1 – Localização da área de estudo.

O setor piloto localiza-se na região noroeste do município de Campo Grande – MS (figura 5.2), na periferia da cidade, caracterizada como uma região predominantemente residencial, com predominância de residências de pequeno porte, e com urbanização já consolidada, principalmente por se tratar de um bairro antigo. Possui 1.632 ligações de consumo, residenciais e comerciais, distribuídas em aproximadamente 9,7 km de rede. A diferença máxima de cota na área é de aproximadamente 29 m (ver apêndice A).



FIGURA 5.2 – Área de abrangência do setor (à direita) e foto da região (à esquerda).

O abastecimento do setor é feito por gravidade, a partir de um reservatório elevado localizado em sua parte mais alta. A base do reservatório encontra-se aproximadamente a uma altura de 15 m, e suas dimensões (base x altura) são 5,70 x 5,70 x 5,60 m (figura 5.3). A alimentação do reservatório é feita por duas bombas, que operam de forma independente, a partir de dois poços próximos. A figura 5.4 ilustra a concepção do abastecimento do setor.

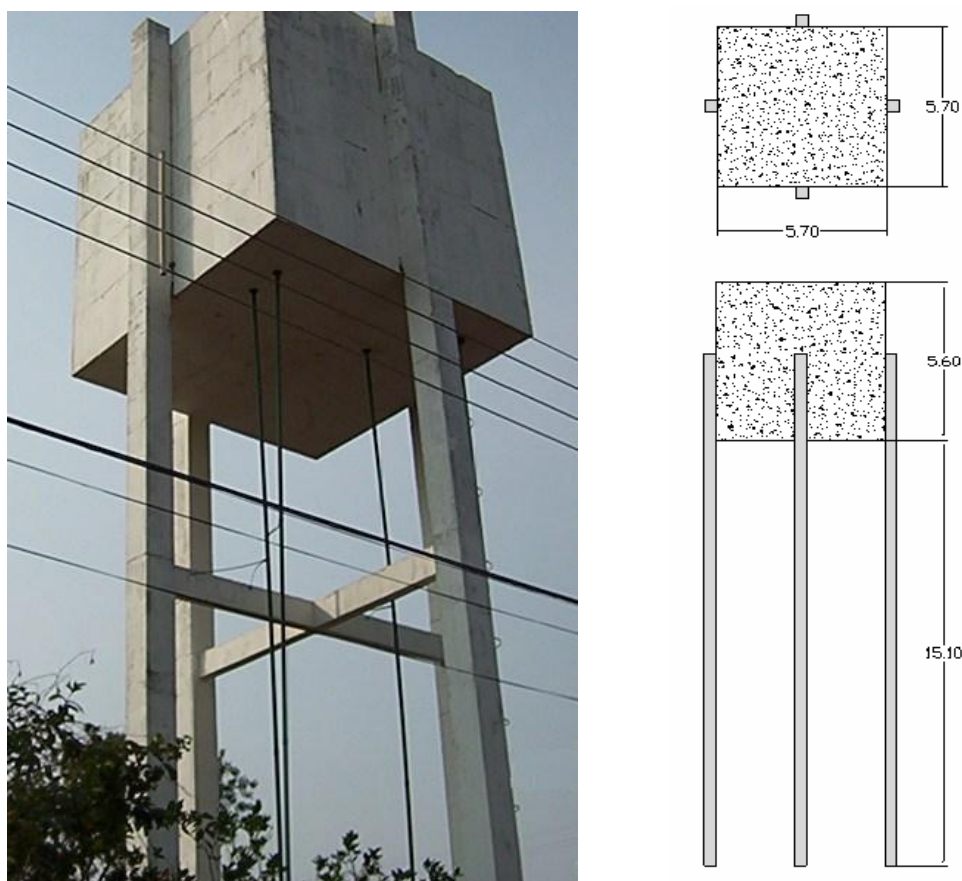


FIGURA 5.3 – Reservatório de distribuição do setor.

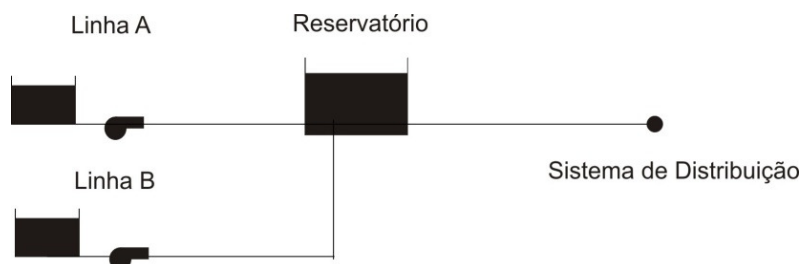


FIGURA 5.4 – Concepção do abastecimento do setor.

O modelo do setor piloto foi implementado no software de modelagem e simulação hidráulica EPANET, desenvolvido pela renomada *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA). A opção por este simulador deve-se à sua característica de software livre e de código fonte aberto (*open source*), permitindo adaptações conforme a necessidade do usuário, e por ser amplamente testado e aprovado por pesquisadores e profissionais da área de todo o mundo. A figura 5.5, abaixo, mostra o modelo do sistema de distribuição estudado, no EPANET. Os parâmetros hidráulicos de tempo e de energia utilizados nas simulações, bem como os coeficientes horários de multiplicação da demanda base, são apresentados no apêndice B.

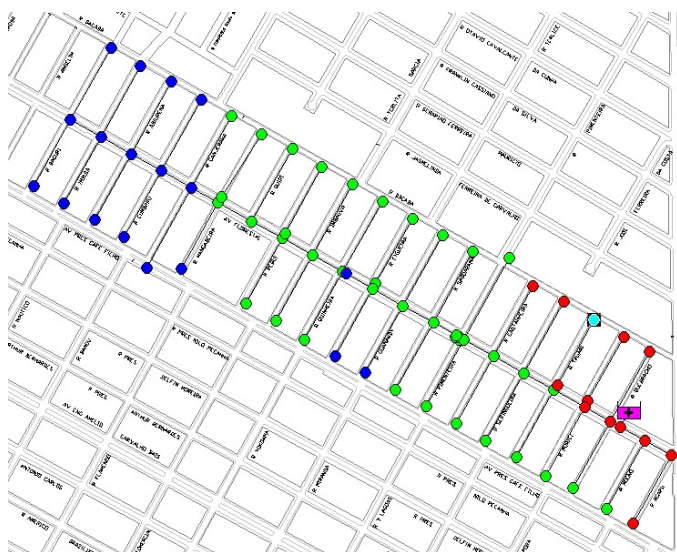


FIGURA 5.5 – Modelo do sistema de distribuição no EPANET.

O setor de distribuição avaliado foi modelado, basicamente, como um reservatório que fornece água a rede de distribuição. Para sua construção foram utilizados dados de micromedicação (volume faturado junto ao consumidor final) e das características físicas do sistema (ver apêndice C, D, E, F), fornecidos pela prestadora de serviço de água do município, além de dados medidos em campo, como a variação da lâmina d'água no interior do reservatório, a vazão de saída do reservatório e a pressão em quatro pontos da rede de

distribuição (figura 5.6). O período de simulação do modelo é de 24 horas, e representa o comportamento do sistema em um dia típico de operação.

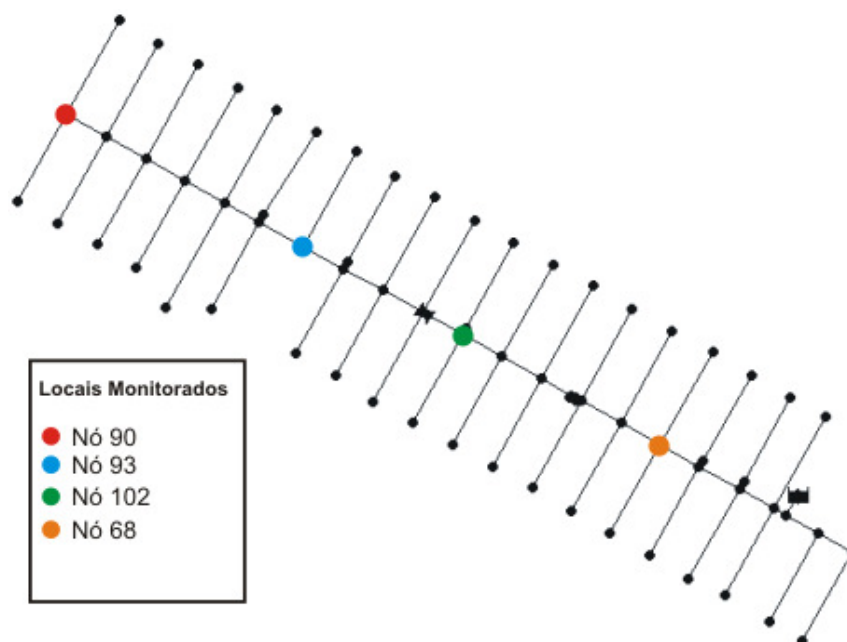


FIGURA 5.6 - Pontos de monitoramento da pressão.

5.1 Diagnóstico das Perdas no Sistema de Distribuição

Neste estudo, realizou-se, inicialmente, um diagnóstico das perdas do sistema utilizando-se, de uma forma simplificada, a metodologia da matriz do balanço hídrico do sistema proposta pela IWA, conforme mostra o quadro 5.1, abaixo.

QUADRO 5.1 – Matriz do balanço hídrico aplicada ao sistema atual (volumes em m³/dia).

Água que entra no sistema (Volume Disponibilizado)	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado
		Consumo autorizado não faturado
	Perdas de água	Perdas aparentes
		Perdas reais

O volume de água que entrou no sistema, para o período de simulação de 24 horas, foi determinado a partir do cálculo da área sob a curva do hidrograma de saída do reservatório de distribuição (figura 5.7).

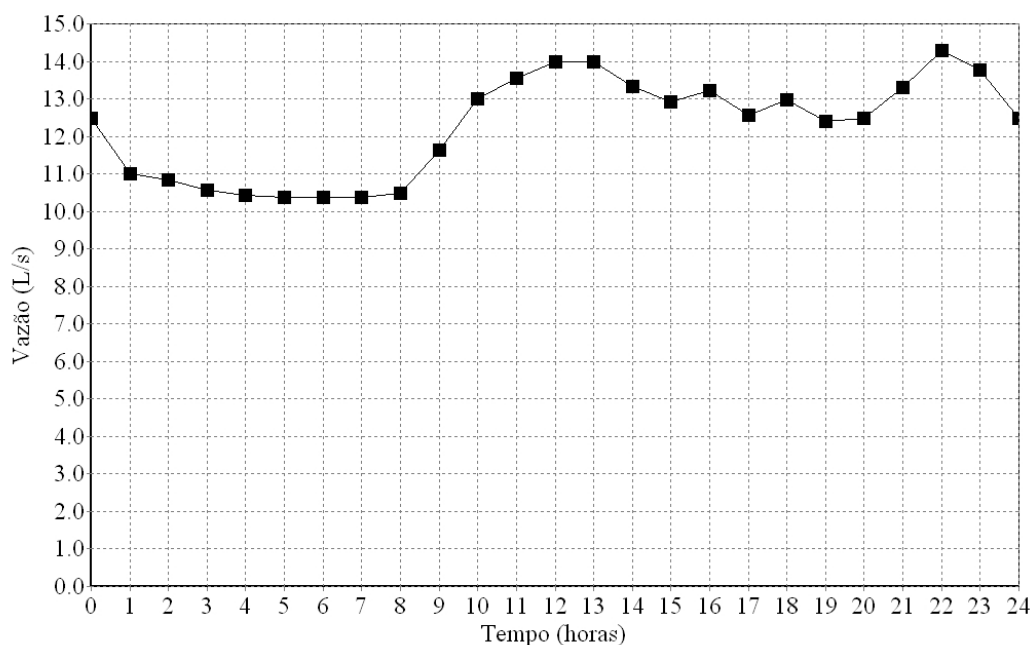


FIGURA 5.7 – Hidrograma de saída do reservatório de distribuição.

O consumo autorizado faturado foi adotado como sendo igual ao volume micromedido junto ao consumidor final, na rede de distribuição. Já o consumo autorizado não-faturado foi desconsiderado neste estudo devido à falta de dados consistentes. Deste modo, o consumo autorizado foi equivalente ao consumo autorizado faturado.

Já as perdas reais foram estimadas pela equação 4.12, a partir dos nós associados a emissores (figura 5.8).

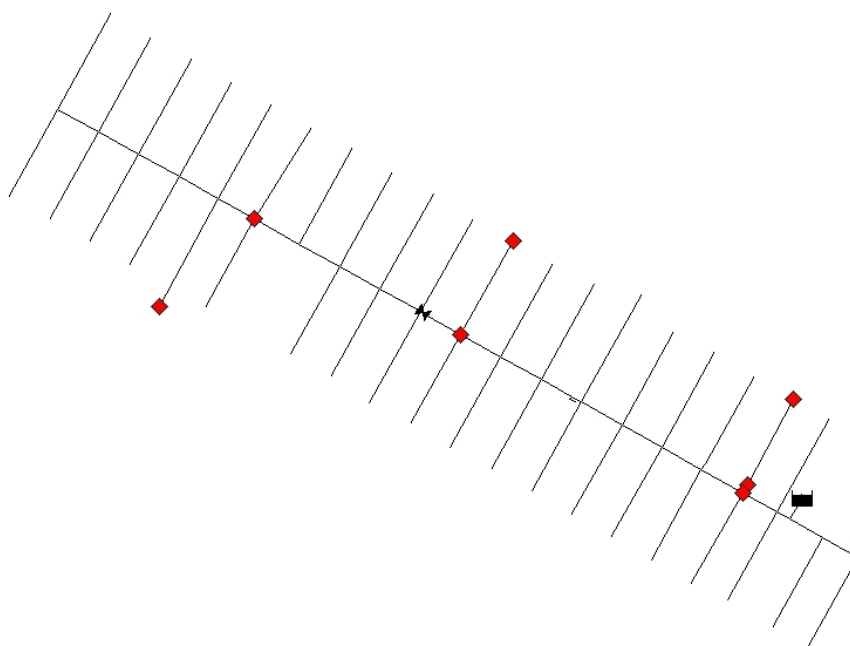


FIGURA 5.8 – Nós do sistema atual associados a coeficientes de emissão.

Por último, as perdas aparentes foram determinadas aplicando-se o balanço hídrico no sistema, ou seja, resultaram da expressão 5.1, abaixo.

$$\text{Perdas Aparentes} = \text{Volume Disponib.} - \text{Consumo Autorizado} - \text{Perdas Reais} \quad (5.1)$$

5.2 Cálculo do Indicador de Perdas Reais

Após a quantificação de todos os possíveis usos da água no sistema, calculou-se o índice de perdas reais na distribuição (PRD), assumindo-se que a soma do consumo autorizado e das perdas aparentes correspondem ao volume fisicamente utilizado (VFU). Embora este indicador não seja adequado para comparar sistemas, ele foi escolhido por possibilitar a comparação de desempenho de cenários distintos de perdas reais no sistema em questão, constituindo-se em um indicador viável ao propósito deste estudo.

Em seguida, procurou-se encontrar valores de coeficientes de emissão (CE) que quando aplicados em todos os nós da rede resultassem em PRD's iguais a 0, 25, 50, e 75%, além de um PRD com valor igual ao da situação atual do sistema. Este processo foi feito por tentativa e erro. Entretanto, com o intuito de diminuir o número de tentativas, foram aplicados os

seguintes valores de CE a todos os nós da rede de distribuição: 0.0005, 0.0010, 0.0050, 0.0100, 0.0500 e 0.1000.

Para cada um destes cenários, o volume de perdas reais foi calculado aplicando-se um balanço hídrico no sistema, determinando-se posteriormente o respectivo PRD. Na aplicação do balanço hídrico, as perdas aparentes foram assumidas como sendo iguais ao produto da fração de perdas aparentes em relação às perdas totais da situação atual (obtida no diagnóstico do sistema), pelas perdas totais dos novos cenários associados aos diferentes CE's, conforme mostra a expressão 5.2, abaixo.

$$\text{Perda Aparente}_{(CE)} = \frac{\text{Perda Aparente Atual}}{\text{Perda Total Atual}} \times \text{Perda Total}_{(CE)} \quad (5.2)$$

Em seguida, estes valores foram plotados em um gráfico PRD x CE, ajustando-se posteriormente, com o auxílio da ferramenta cftool do software Matlab, uma curva aos pontos plotados. A partir desta curva foi possível identificar em quais intervalos de CE se encontravam os PRD's desejados.

5.3 Configurações de Bombeamento Avaliadas

Nesta etapa, foram feitas adaptações no modelo original de forma a se avaliar o impacto de diferentes cenários de perdas reais, a partir dos valores de PRD's obtidos, sobre o consumo de energia do sistema elevatório para duas concepções hipotéticas e distintas de bombeamento:

- Conceção 1: Bombeamento para um reservatório de distribuição;
- Conceção 2: Bombeamento direto na rede de distribuição.

Esta adaptação foi feita porque o sistema de distribuição foi modelado como um reservatório de nível fixo que abastece uma rede de distribuição. Desta forma, a aplicação de um balanço hídrico no reservatório, após a variação das perdas reais na rede de distribuição, resultaria tão somente numa variação do volume de água na entrada do reservatório. Como não se dispunha de dados referentes às características e operação do sistema elevatório real,

julgou-se necessária tal modificação, com a finalidade de se avaliar, efetivamente, o consumo de energia do conjunto elevatório em diferentes cenários de perdas reais.

5.3.1 Bombeamento para reservatório de distribuição

A figura 5.9 apresenta o esquema da concepção 1 de bombeamento para o setor, após as modificações feitas no modelo original. Os números entre parênteses indicam os elementos do sistema associados a nós (fonte, reservatório e junções), enquanto que os demais números indicam os elementos associados a tubulações (bomba, válvula e tubos). As características físicas dos nós e tubulações da concepção 1 encontram-se no apêndice G.

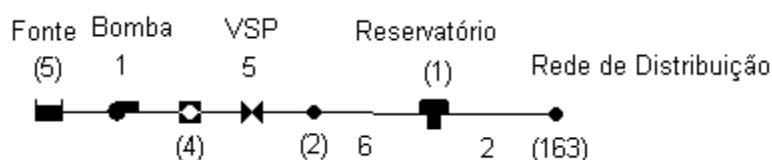


FIGURA 5.9 – Concepção 1: Bombeamento para reservatório de distribuição.

Para esta concepção de bombeamento, adotou-se um reservatório de distribuição com diâmetro de base igual a 6,43 m, que corresponde a uma área de 32,47 m², ou seja, igual à área da base do reservatório real (5,70 x 5,70 m). Além disso, estipulou-se a altura de 1,68 m e 5,60 m como sendo, respectivamente, os níveis mínimos e máximos de operação do reservatório, os quais correspondem ao volume útil de 30% e 95%. Considerou-se para o tempo inicial de simulação (0:00 h) a altura de lâmina d'água de 2,46 m, a qual corresponde ao nível d'água verificado no modelo original, neste mesmo tempo.

Embora o reservatório seja alimentado por duas bombas, para a avaliação desta concepção foi considerada somente uma única bomba recalçando água ao reservatório. Optou-se pela escolha de uma bomba de velocidade de rotação constante, por ser amplamente utilizadas nos sistemas de abastecimento de água no Brasil e pela maior facilidade de ser modelada. O ponto de operação da bomba foi determinado por tentativa e erro, de forma que a vazão e a energia fornecida pela bomba fossem suficientes para vencer o desnível geométrico, considerar as perdas de carga, e proporcionassem um PRD (quando aplicado o respectivo CE em todos os nós da concepção 1) e uma pressão no nó mais desfavorável próximos dos

valores encontrados no modelo original. Por fim, a curva da bomba foi traçada pelo próprio EPANET a partir do ponto de operação fornecido.

Também foi estipulada a operação da bomba (ligamento e desligamento), a partir da ferramenta de “controle simples” fornecida pelo EPANET, conforme mostra a figura 5.10. Cada vez que o nível de água do reservatório atingisse o nível mínimo ou máximo de operação, a bomba era, respectivamente, acionada ou desligada.

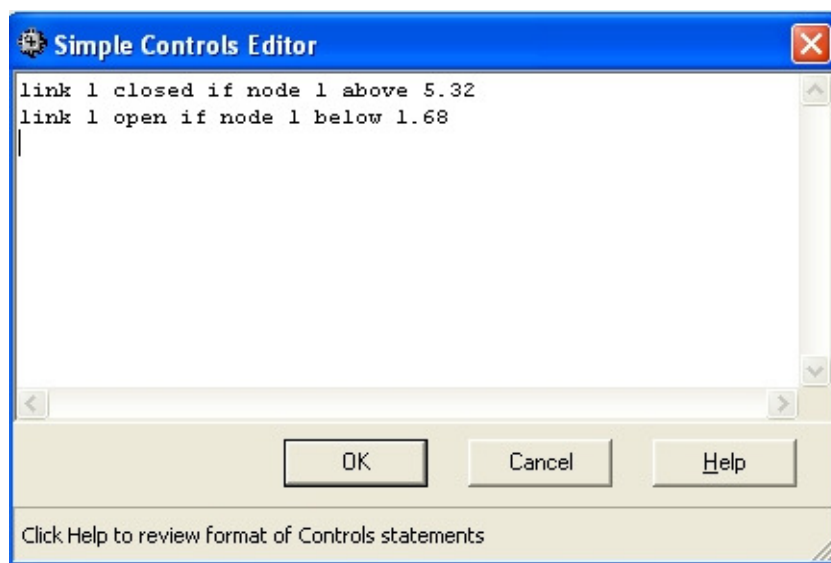


FIGURA 5.10 – Controle da operação da bomba.

Já a válvula sustentadora de pressão (VSP) foi utilizada, neste caso, somente como um artifício de modelagem para simular a entrada “por cima” no reservatório, mantendo o ponto de operação da bomba constante durante o seu funcionamento.

5.3.2 Bombeamento direto na rede de distribuição

A figura 5.11 apresenta a segunda hipótese de concepção de bombeamento para o setor, após as devidas modificações no modelo original. Os números entre parênteses indicam os elementos do sistema associados a nós (fonte e junções), enquanto que os demais números indicam os elementos associados a tubulações (bomba e tubos). As características físicas dos nós e tubulações da concepção 2 encontram-se no apêndice G.

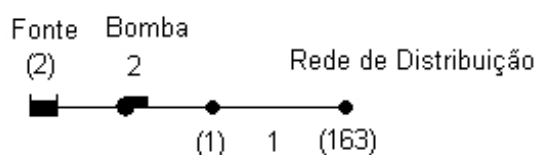


FIGURA 5.11 – Concepção 2: Bombeamento direto na rede de distribuição.

Nesta concepção de bombeamento, também foi utilizada uma bomba de velocidade constante, e sua escolha deve-se aos mesmos motivos apresentados anteriormente. O ponto de operação da bomba foi determinado de forma análoga ao da concepção 1, a partir do qual foi traçado a curva da bomba pelo próprio EPANET.

5.4 Cálculo do Consumo de Energia e do Indicador de Desempenho Energético do Sistema

Para a avaliação do impacto das perdas reais sobre o consumo de energia do sistema, adotou-se a recomendação de Walski (2004), que sugere que esta avaliação seja focalizada nas bombas, onde de fato a energia é consumida.

Assim, a partir do hidrograma de saída das bombas e de suas curvas características, calculou-se a altura total de elevação H , em metros, fornecida pela mesma ao escoamento, para cada intervalo de 1 hora, durante o período de simulação de 24 horas. Uma vez obtidas as vazões Q e as alturas totais de elevação H , ao longo do dia típico de operação, traçou-se o gráfico Potência x Tempo a partir da equação 5.3 (PORTO, 1998). Neste cálculo, foi considerado um rendimento global η igual a 75% para o conjunto motor-bomba.

$$Pot = \frac{9.8 \times Q \times H}{\eta} \quad (5.3)$$

Onde Pot é a potência consumida pelo conjunto elevatório em kW, Q é a vazão bombeada em m^3/s , e H é a altura total de elevação do conjunto elevatório em metros.

A energia em kW.h consumida pelo sistema de bombeamento, em cada uma das concepções avaliadas, para os diferentes cenários de perdas reais, foi determinada calculando-se a área sob a curva do gráfico Potência x Tempo.

Após a determinação do consumo de energia elétrica, foi calculado o consumo específico de energia (CEE) das duas concepções avaliadas, para os diferentes cenários de perdas reais. Pretende-se com a opção por este indicador, avaliar se a sua utilização é realmente eficaz para acompanhar a evolução do desempenho energético de um sistema sujeito à diferentes níveis de perdas reais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Diagnóstico de Perdas do Sistema Atual

A área sob a curva do hidrograma de saída do reservatório, mostrado na figura 5.7, resultou em um volume de entrada no sistema igual a $1.059,55 \text{ m}^3$, para o período de análise considerado. Este volume de entrada, juntamente com o volume micromedido (estimado a partir de dados mensais de micromedicação fornecidos pela empresa) e o volume de perdas reais do sistema (estimado a partir da equação 4.12), foi utilizado como dado de entrada da matriz de balanço hídrico (tabela 6.1), a qual apresenta o diagnóstico das perdas de água no sistema atual.

TABELA 6.1 – Balanço hídrico do sistema atual, para um dia típico de operação.

Água que entra no sistema	Consumo autorizado 420.77 m^3 (39,7%)	Consumo autorizado faturado 420.77 m^3 (39,7%)
		Consumo autorizado não faturado 0.00 m^3
1059.55 m^3 (100%)	Perdas de água 638.78 m^3 (60,3%)	Perdas aparentes 14.04 m^3 (2,2%)
		Perdas reais 624.74 m^3 (97,8%)

6.2 Relação entre PRD e CE

Os dados obtidos no balanço hídrico revelam que o sistema atual possui um índice de perda real na distribuição (PRD) de aproximadamente 59%, ou seja, a cada 100 L de água que entra no sistema, 59 L são perdidos através de vazamentos.

A tabela 6.2 apresenta os valores de CE relacionados aos cenários de perdas reais avaliados. Estes valores foram determinados com o auxílio da curva mostrada na figura 6.1, cuja construção foi descrita na seção 5.2.

TABELA 6.2 – Relação entre CE e PRD.

CE	PRD (%)
0.0040	25.45
0.0130	50.11
0.0190	58.75
0.0450	75.13

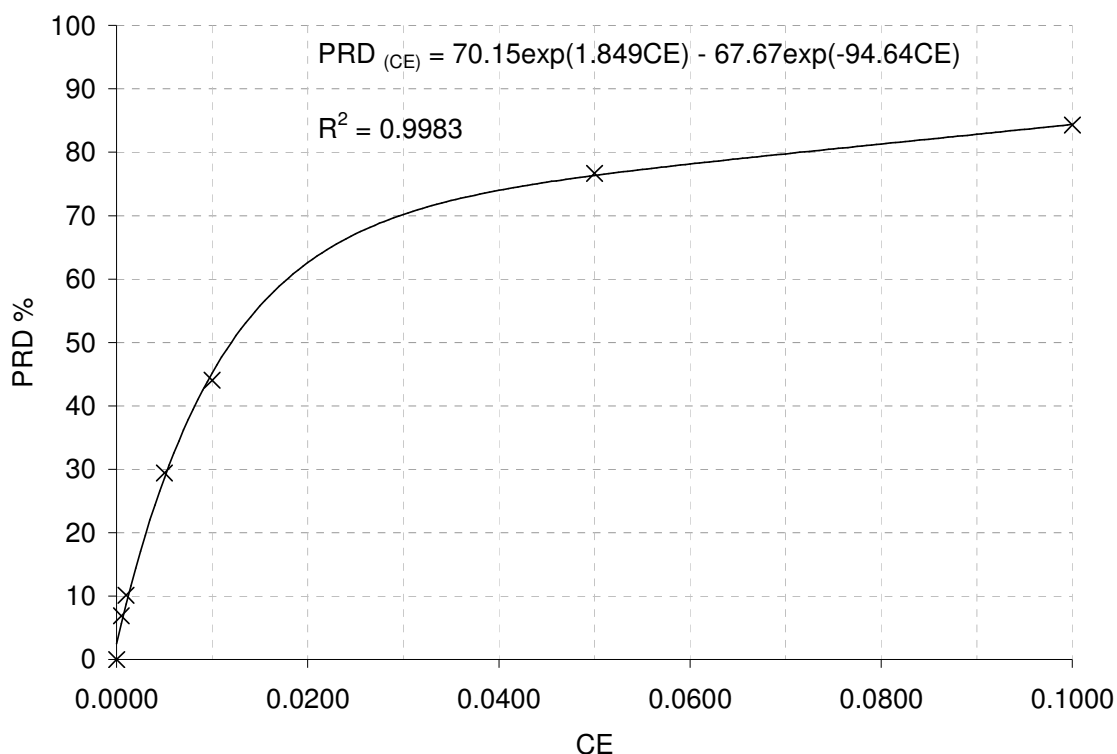


FIGURA 6.1 – Gráfico PRD x CE

A figura 6.1 mostra que o PRD do sistema aumenta à medida que ocorre um incremento no valor de CE. Nota-se, ainda, que as variações das perdas reais, neste sistema específico, são mais acentuadas quando ocorrem variações em uma faixa de pequenos valores de CE (menores que 0.0010).

Embora a curva mostrada na figura 6.1 seja uma boa ferramenta para estimar valores de PRD's associados a CE's, sua utilização e interpretação requer certa cautela, uma vez que não se pode tirar dela conclusões a respeito de sua interpretação física e nem afirmar que tal curva (associada a um sistema específico) representa o comportamento geral dos vazamentos em relação a magnitude do CE.

6.3 Curvas Características dos Sistemas Elevatórios

As curvas características dos sistemas elevatórios da concepção de bombeamento 1 e 2 são mostradas na figura 6.2. Elas foram traçadas pelo próprio EPANET a partir dos seguintes pontos de operação: Pconcep.1 (21 L/s, 21 m) e Pconcep.2 (21 L/s, 15 m). Os erros médios, em relação à situação original, resultantes da adoção destes pontos de operação, são mostrados na tabela 6.3, abaixo.

TABELA 6.3 – Erro relativo médio das concepções de bombeamento avaliadas, em relação ao sistema original.

Parâmetro		PRD	Pressão nó 70
Erro Relativo Médio	Concepção1	0.10 %	7.29 %
	Concepção2	0.15 %	0.70 %

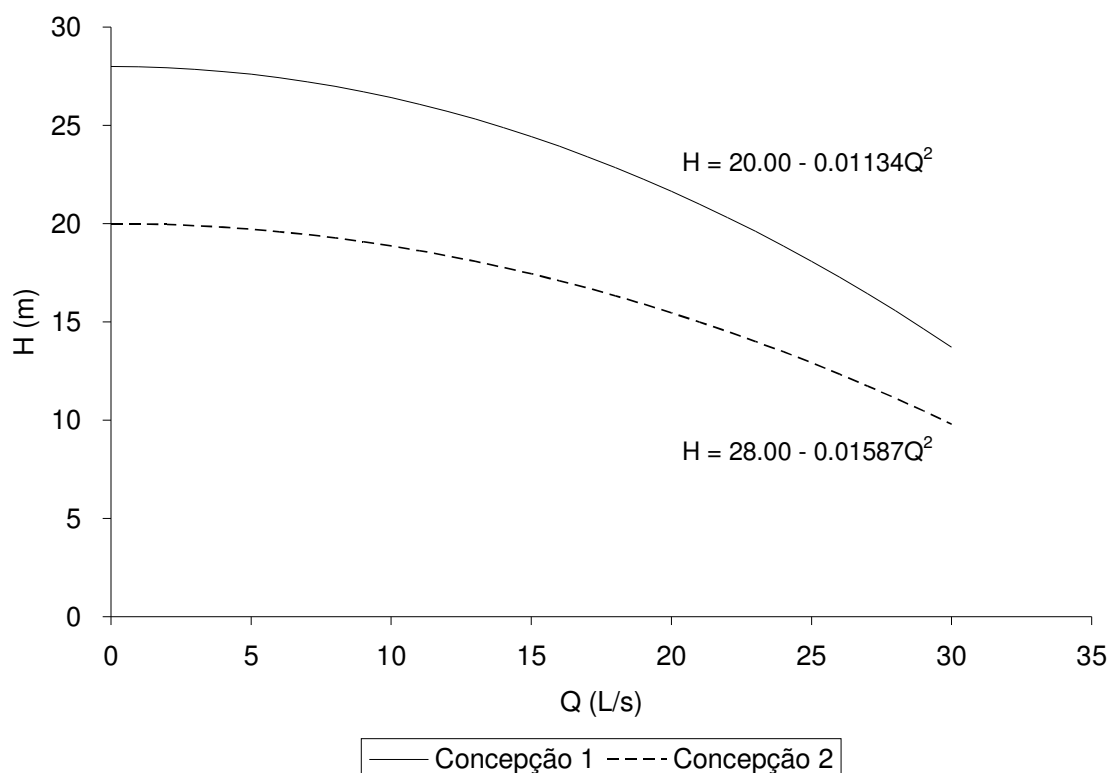


FIGURA 6.2 – Curvas características das bombas.

Os valores apresentados na tabela 6.3, mostram que as modificações feitas tanto na concepção 1 quanto na concepção 2, em relação ao sistema original, não provocaram uma mudança significativa no PRD do sistema e na pressão do nó 70. O valor de erro mais elevado (7,29 %), encontrado na análise da pressão do nó mais desfavorável, decorre do fato de que nesta concepção o reservatório foi modelado de forma a operar com lâmina d'água variável, ao contrário do reservatório de lâmina d'água fixa utilizado no modelo da situação original.

6.4 Consumo de Energia

A figura 6.3 apresenta a potência consumida pelo conjunto elevatório de cada uma das concepções avaliadas, para os diferentes cenários de perdas reais.

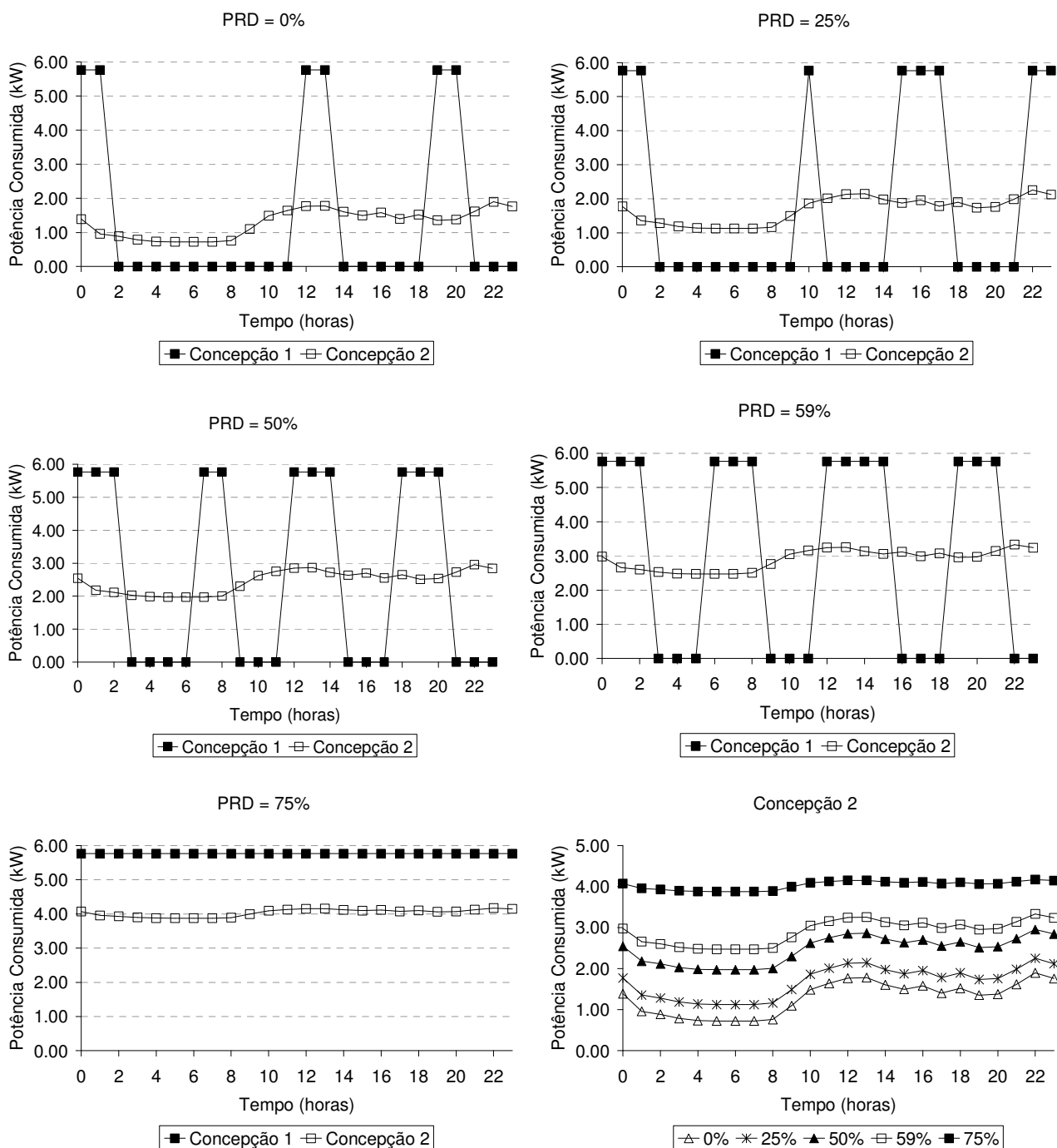


FIGURA 6.3 – Potência consumida para diferentes cenários de perdas.

Da figura acima, observa-se, para a concepção 1, que o aumento das perdas no sistema resulta em um maior número de acionamentos e maior tempo de funcionamento do conjunto elevatório. Ainda para esta concepção, a figura 6.3 também mostra que somente para o PRD igual a 75 % a bomba operou continuamente durante todo o período de simulação (24 horas). Nota-se, portanto, que quanto maior o PRD, ou seja, quanto maiores as perdas reais no sistema, maior é o tempo de funcionamento do conjunto elevatório e, conseqüentemente, maior é a quantidade de energia consumida pelo mesmo.

Já na segunda concepção de bombeamento, o conjunto motor-bomba operou de forma contínua para todos os cenários de perdas reais, para o período de simulação considerado. A figura 6.3 mostra que a potência consumida pelo conjunto elevatório aumenta com o incremento do PRD do sistema. É importante notar que a distância entre as curvas de potência tende a aumentar com o aumento dos PRD's, mostrando que variações no PRD do sistema, caso o mesmo encontre-se em uma faixa de valores elevados (maiores que 50%), resulta em uma maior variação do consumo de energia do sistema de bombeamento.

A figura 6.4 apresenta o consumo de energia das duas concepções de bombeamento, para os diferentes cenários de perdas reais avaliados.

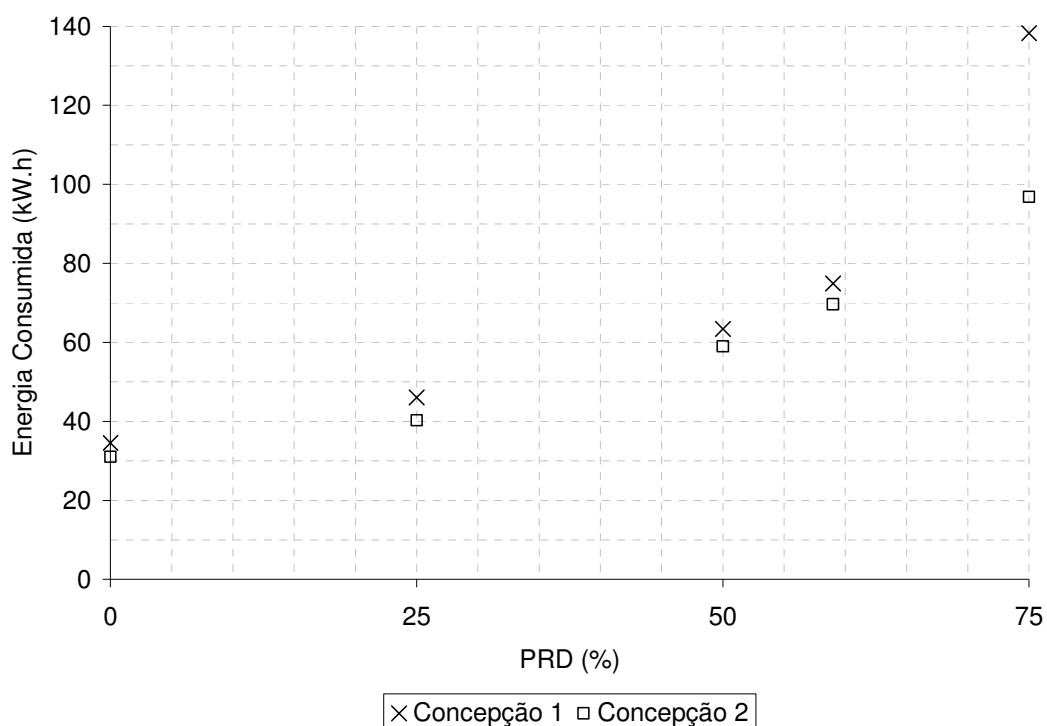


FIGURA 6.4 – Consumo de energia para diferentes cenários de perdas reais.

Pela figura 6.4, acima, observa-se que para ambas as concepções o consumo de energia elétrica aumenta com o aumento das perdas reais do sistema. Para todos os cenários de perdas reais avaliados, o consumo de energia da concepção 1 foi maior do que o da concepção 2, embora a diferença mais significativa tenha ocorrido no cenário correspondente a um PRD igual a 75%. Assim, para este sistema e considerando-se somente este parâmetro (consumo de energia elétrica), o bombeamento direto na rede mostrou-se a opção de concepção mais vantajosa.

A figura 6.5 mostra o incremento do consumo de energia de ambas as concepções avaliadas, em relação à porcentagem de perdas reais acima da demanda. Os valores referentes a concepção 1 ajustaram-se bem a uma função exponencial do tipo $a \cdot \exp(b \cdot x)$, enquanto que os referentes à concepção 2 ajustaram-se melhor a uma função polinomial de segundo grau do tipo $ax^2 + bx$, conforme apresentado por Colombo e Karney (2002).

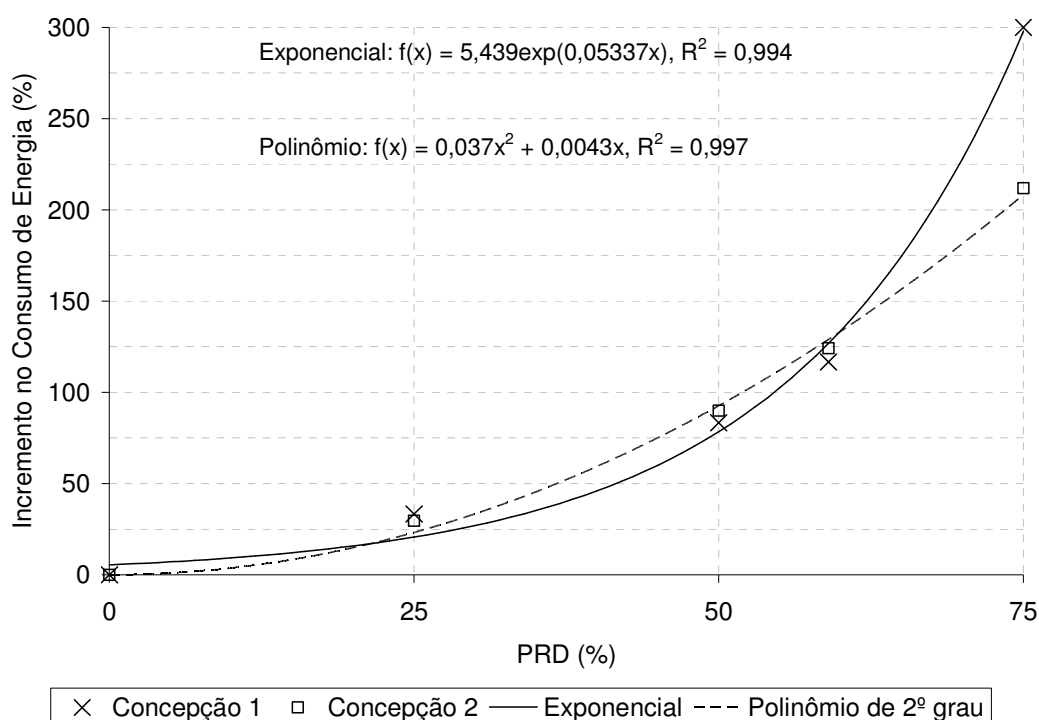


FIGURA 6.5 – Impacto relativo das perdas reais no consumo de energia.

A figura 6.6 apresenta a variação no consumo de energia resultante da mudança do cenário de perdas reais, em relação ao PRD verificado no diagnóstico do sistema atual (59%). Observa-se que a redução do PRD de 59% (situação atual) para 50%, resulta em uma economia no consumo de energia da ordem de 15% para ambas as concepções. Esta economia pode chegar a 38,5% e 42,2%, para as concepções 1 e 2, respectivamente, caso as perdas reais do sistema sejam reduzidas para um patamar de PRD igual a 25%. Por outro lado, um aumento das perdas reais no sistema, que pode estar associado ao envelhecimento dos materiais, má execução de obras e operação inadequada (elevadas pressões e manobras no sistema), provoca um incremento significativo no consumo de energia do conjunto elevatório, chegando a alcançar os valores de 84.6 % (concepção 1) e 39.1 % (concepção 2), para um PRD de 75% .

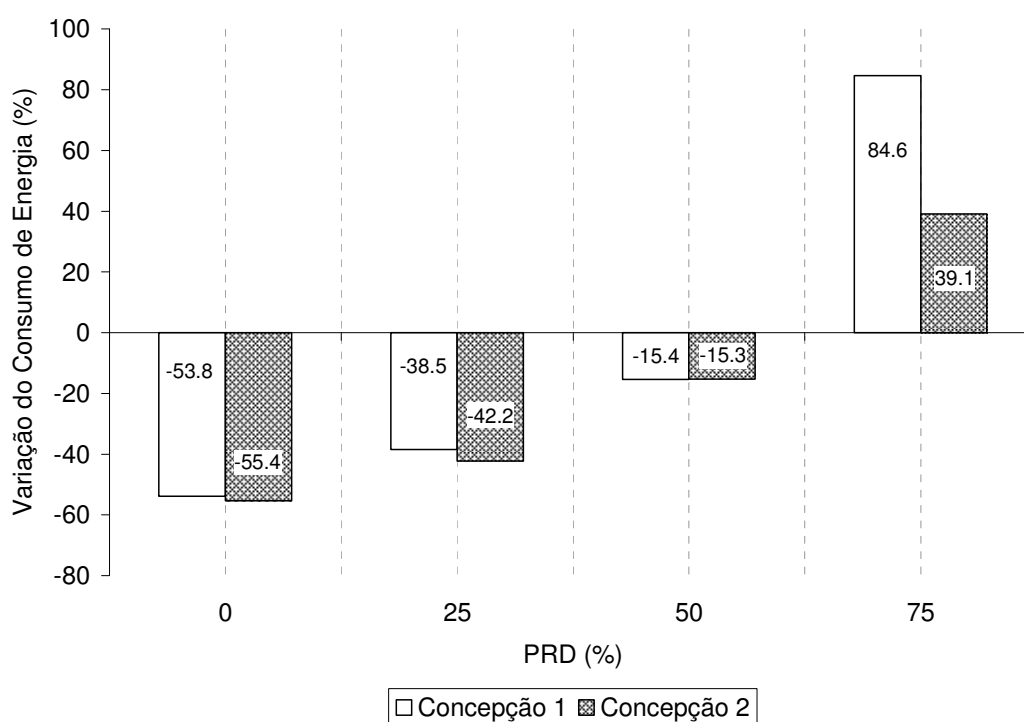


FIGURA 6.6 – Variação no consumo de energia decorrente da mudança do cenário de perdas reais da situação atual.

6.5 Indicadores de Desempenho Energético

A figura 6.7 apresenta o consumo específico de energia do conjunto elevatório de cada uma das concepções propostas, para cada um dos cenários de perdas reais avaliados.

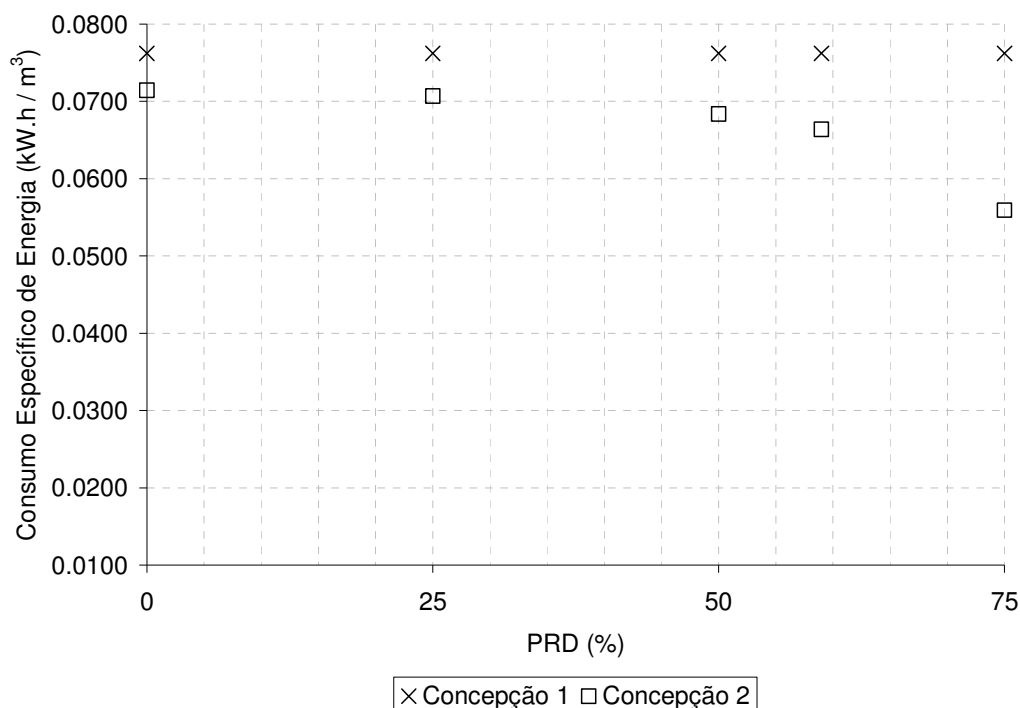


FIGURA 6.7 – Consumo específico de energia elétrica.

Da figura 6.7 observa-se que o consumo específico de energia (CEE) da concepção 1 foi maior do que o da concepção 2 em todos os cenários de perdas reais avaliados. Entretanto, não se pode afirmar que a concepção 2 apresenta um melhor desempenho energético do que a concepção 1, uma vez que este indicador não é recomendado para comparar estações de bombeamento distinta.

A figura 6.7 também revela que este indicador não se mostrou sensível aos diferentes cenários de perdas reais avaliados na concepção 1, permanecendo constante para os diferentes valores de PRD's. Já na concepção 2, os valores do indicador diminuiu com o aumento das perdas reais no sistema, ou seja, o sistema apresentou, segundo este indicador, um melhor desempenho energético para o cenário de maior valor de perdas reais. Assim, a utilização deste indicador para a análise do desempenho energético dos conjuntos elevatórios de um sistema, em diversos cenários de perdas reais, deve ser visto com reservas, uma vez que ele não mostra a parcela de energia desperdiçada alimentando-se vazamentos.

7. CONCLUSÕES

O diagnóstico do sistema mostrou que os vazamentos na rede de distribuição respondem pela maior parte das perdas totais do sistema, correspondendo a aproximadamente 59% de toda água que entra no sistema.

Este estudo mostrou que o indicador de perdas reais utilizado nesta avaliação (PRD) aumenta com o aumento do valor de CE, quando este é aplicado em todos os nós do sistema. E para este sistema em especial, variações em uma faixa de valores pequenos de CE (menores que 0.0100) provocam variações mais acentuadas nos valores do PRD do sistema.

As modificações feitas no modelo original, com a finalidade de avaliar o impacto das perdas sobre o conjunto elevatório em um bombeamento para reservatório de distribuição (concepção 1) e outro direto na rede (concepção 2), não provocaram mudanças significativas no PRD do sistema e no valor da pressão no nó mais desfavorável (nó 70), ou seja, a metodologia adotada para a realização destas modificações mostrou-se satisfatória.

Quanto a análise do consumo de energia, verificou-se que a concepção 2 consumiu uma menor quantidade de energia do que a concepção 1 em todos os cenários de perdas reais avaliados, sendo mais significativo para o PRD de 75%. O incremento da energia, em relação ao aumento da porcentagem de perdas acima da demanda, seguiu uma função exponencial, para a concepção 1, e um polinômio de segundo grau, para a concepção 2.

Na concepção 1, caracterizada por um bombeamento à rotação constante para um reservatório de distribuição com entrada “por cima”, o consumo de energia do conjunto elevatório aumentou com o incremento do PRD do sistema. Este consumo mostrou-se dependente somente do número de vezes que o conjunto elevatório é acionado e de seu tempo de funcionamento. O mesmo foi verificado para a concepção 2, a qual, todavia, apresentou um aumento mais acentuado no consumo de energia para variações crescentes do PRD na faixa de valores acima de 50%.

A análise do consumo de energia também mostrou que a redução do PRD do sistema atual (59%) para patamares inferiores a 50% resulta em uma economia substancial de energia para ambas as concepções avaliadas, chegando a uma economia de 38.5% (concepção 1) e 42.2% (concepção 2) para um PRD igual a 25%.

A avaliação de desempenho energético do sistema mostrou que a utilização do consumo específico de energia como indicador deve ser tomada com reservas, uma vez que ele não foi sensível às mudanças de perdas reais na concepção 1, permanecendo constante, e indicou um

melhor desempenho energético na concepção 2 à medida que aumentaram as perdas reais do sistema. Portanto, este estudo mostra que o consumo específico de energia não é um eficaz para representar a quantidade de energia elétrica que é desperdiçada alimentando-se vazamentos.

8. RECOMENDAÇÕES

Neste estudo não foi considerado o impacto das perdas reais na pressão do sistema de distribuição, principalmente porque o sistema estudado não apresentou nenhum ponto em que a pressão estivesse abaixo do valor mínimo exigido por norma de 10 m.c.a (ABNT, 1994), para todos os cenários de perdas reais avaliados. Entretanto, recomenda-se para os próximos estudos que a avaliação do impacto das perdas reais no consumo de energia dos sistemas de bombeamento leve em conta as variações de pressão no sistema, de forma a garantir um nível de serviço equivalente, conforme sugere Colombo e Karney (2002).

Neste trabalho, os volumes autorizados não-faturados de água foram desconsiderados. Assim, recomenda-se para os próximos estudos, a construção de cenários que englobem estes volumes, que mesmo na ausência de dados consistentes, podem ser definidos como um valor constante ou proporcional ao volume faturado.

Os indicadores de perdas e de desempenho energético utilizados neste trabalho não são adequados para comparar sistemas e grupos elevatórios. Desta forma, recomenda-se, para os próximos estudos, a utilização de indicadores capazes de representar as características do sistema (número de ligação, extensão na rede, topologia, pressão na rede, etc) ao invés dos indicadores percentuais.

Nas concepções de bombeamento avaliadas neste trabalho, foram utilizadas bombas com velocidade de rotação constante, e considerado um rendimento extremamente otimista do conjunto motor-bomba (75%). Assim, recomenda-se, para os próximos estudos, avaliar a influência das perdas sobre o conjunto elevatório composto por um motor e uma bomba de rotação variável, cujo rendimento global represente às condições encontradas nos sistemas reais. Para esta avaliação, além das duas concepções de bombeamento abordadas neste estudo (bombeamento para reservatório de distribuição, com entrada por cima, e bombeamento direto na rede), sugeri-se uma terceira concepção, caracterizada por um bombeamento “afogado” para reservatório de distribuição.

No Brasil são praticadas diferentes modalidades tarifárias estabelecidas pela resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desta forma, recomenda-se, a determinação do custo do consumo de energia elétrica de ambas as concepções, para os diferentes cenários de perdas reais avaliados, na modalidade tarifária convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tal estudo teria a finalidade de mostrar que embora a

concepção de bombeamento direto na rede tenha apresentado um menor consumo de energia, o seu custo pode ser maior, uma vez que a operação do conjunto elevatório é contínua, ao contrário do bombeamento para reservatório de distribuição, que pode ser realizado fora dos horários de ponta.

Por fim, recomenda-se estudar possíveis medidas de redução do índice atual de perdas reais do sistema, realizando posteriormente uma análise econômica dos investimentos, o qual deve incluir, além das despesas com energia elétrica, outras despesas relacionadas ao tratamento e transmissão da água, tais como insumos químicos, materiais e equipamentos, transporte e mão-de-obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12218 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994.

ALEGRE, H. *et al.* **Performance indicators for water supply service**. IWA Publishing, 2000.

ARAÚJO, L. S. **Controle de perdas na gestão sustentável dos sistemas de abastecimento de água**. 2005. Tese de Doutorado - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

COLOMBO, A. F. and KARNEY, B. W. Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive Picture. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol. 128, Nº. 6, November 1, 2002, pp. 441-450.

COLOMBO, A. F. and KARNEY, B. W. Impacts of leaks on energy consumption in pumped systems with storage. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol. 131, Nº. 2, March 1, 2005.

DUARTE *et al.* Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento. In: VIII SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO, 2008.

ELETROBRÁS. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

GOMES, H. P. **Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

GONÇALVES, E. e ITONAGA, L. C. **Controle de perdas em sistemas de água**. Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, 2007.

JAMES, K. *et al.* **Água e energia: aproveitando as oportunidades de efficientização de água e energia não exploradas nos sistemas municipais**. Alliance: Aliança para Conservação de Energia, 2002.

LAMBERT *et al.* A review of performance indicators for real losses from water supply systems. In: AQUA, 48(6), 227-237, 1999.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Revista saneamento para todos**. Brasília, ano 1, nº. 1, p. 29, set. 2005.

MIRANDA, E. C. Modernização do setor saneamento no Brasil. **Revista Saneamento Para Todos**, Brasília, ano 2, nº 4, p. 5-7, nov. 2007.

MIRANDA, E. C. Indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Cancún, México, 2002.

OTERO, O. L. C. *et al.* Método expedito para avaliação de desempenho de conjuntos motobombas. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.

PROCEL SANEAR. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica no Setor de Saneamento**. Disponível em:

<<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?ViewID={0834440C-50C4-46EF-9990-C35F19A289A8}>>. Acesso em 17 de novembro de 2007.

REIS, L. F. R. *et al.* Optmal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol. 123, Nº 6, Nov/Dec, 1997.

ROSSMAN, L. A. **Epanet 2 users manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2000.

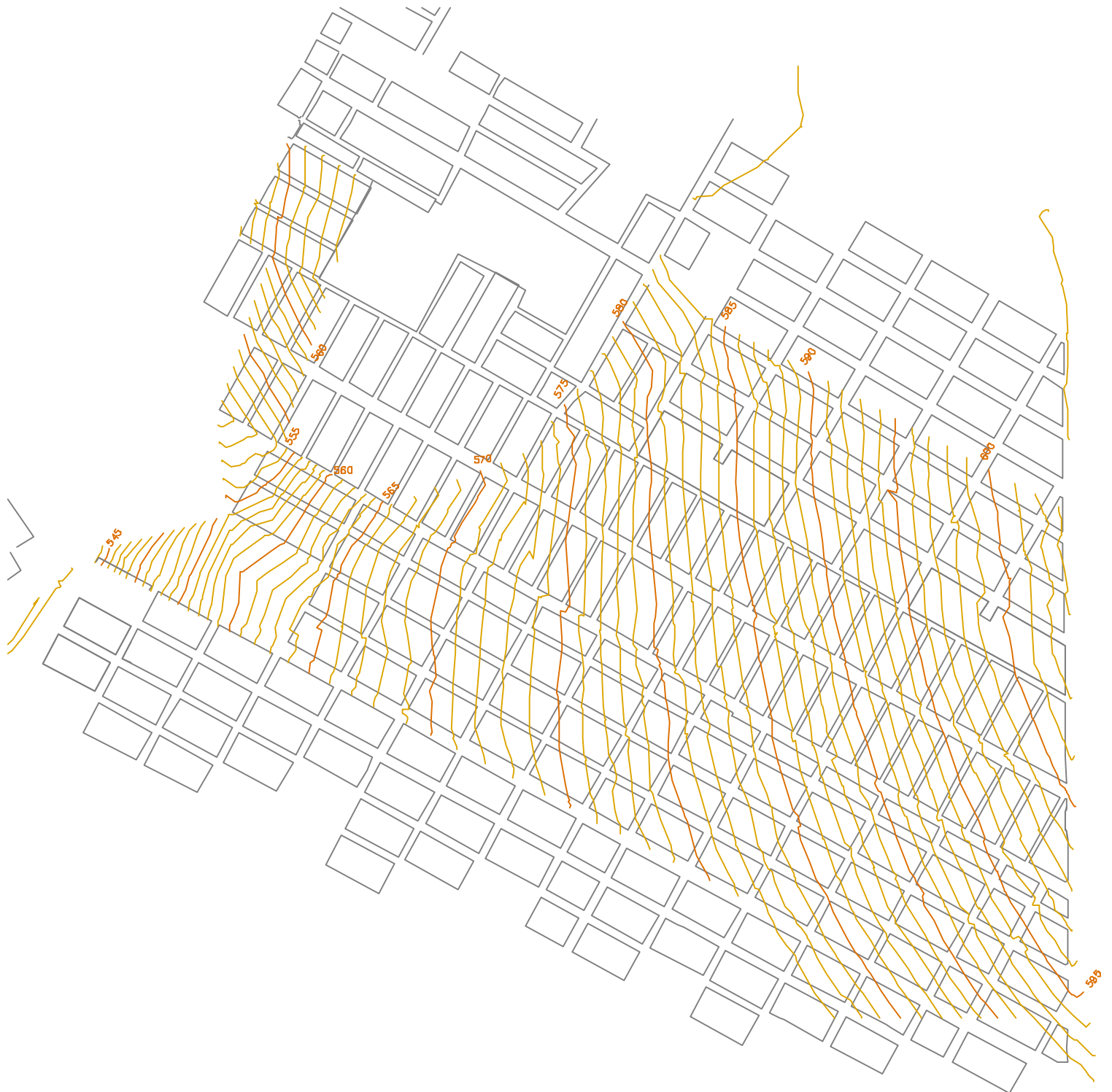
SILVA, R. T.; CONEJO, J. G. L.; MARCKA, E. **Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água - DTA A2**. Brasília, DF: Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água - PNCDA, Ministério das Cidades, 2004.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2006**. Brasília, DF, 2006.

TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. In: TSUTIYA, M. T. (Ed.). **Abastecimento de água**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. cap. 10, p.457-525.

TSUTIYA, M. T. e DAVID, A. C. Eficiência energética em sistemas de abastecimento de água da cidade de Ubatuba, Estado de São Paulo. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.

WALSKI, T. M. Discussion of “Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture” by A. F. Colombo e B. W. Karney. **Journal of Water Resources Planning and Management**, march-april 2004, pp. 180-183.

APÊNDICE A – Planialtimetria da área onde se localiza o setor.

Escala 1:10

APÊNDICE B - Parâmetros utilizado nas simulações e coeficientes horários de multiplicação da demanda base.

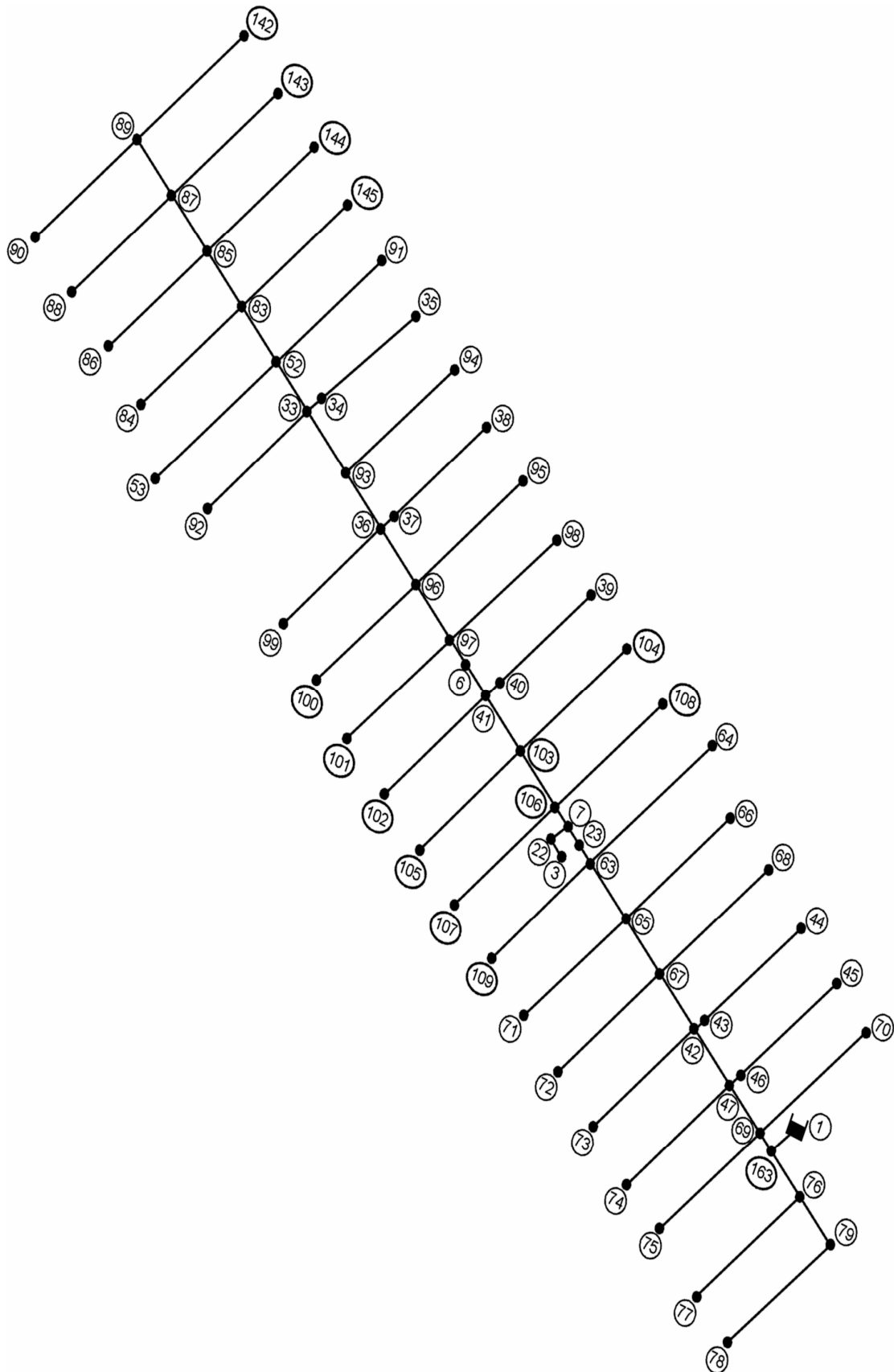
Hydraulics Options	
Property	Value
Flow Units	LPS
Headloss Formula	D-W
Specific Gravity	1.0000
Relative Viscosity	1.0000
Maximum Trials	40
Accuracy	0.00100000
If Unbalanced	CONTINUE
Default Pattern	1
Demand Multiplier	1.00
Emitter Exponent	0.5000
Status Report	No
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0

Energy Options	
Property	Value
Pump Efficiency (%)	75.00
Energy Price/kwh	0
Price Pattern	
Demand Charge	0.0000

Times Options	
Property	Hrs:Min
Total Duration	24:00
Hydraulic Time Step	1:00
Quality Time Step	0:04
Pattern Time Step	1:00
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	1:00
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	0:00:00
Statistic	NONE

Tempo (Horas)	Coeficiente de Multiplicação da Demanda Base	Tempo (Horas)	Coeficiente de Multiplicação da Demanda Base
0	1.42	12	1.32
1	1.11	13	1.43
2	0.76	14	1.44
3	0.70	15	1.29
4	0.62	16	1.20
5	0.58	17	1.27
6	0.57	18	1.12
7	0.57	19	1.22
8	0.57	20	1.08
9	0.60	21	1.10
10	0.87	22	1.30
11	1.19	23	1.54

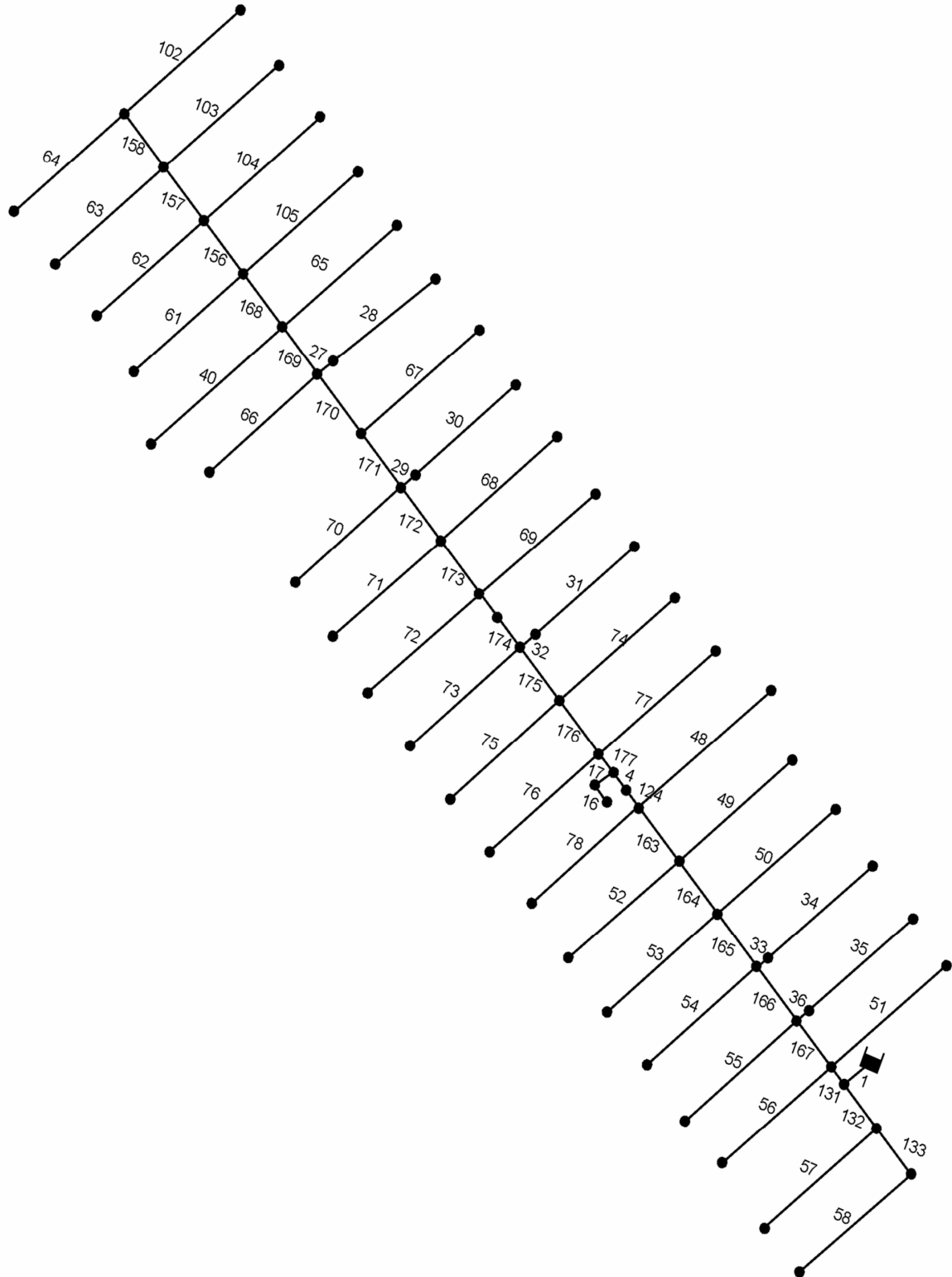
APÊNDICE C - Número dos nós do modelo.



APÊNDICE D – Características físicas dos nós do modelo.

Nó	Cota (m)	Demanda (L/s)		Nó	Cota (m)	Demanda (L/s)
3	591.93	0.00		79	600.50	0.05
22	591.71	0.00		83	576.50	0.09
23	591.92	0.00		84	574.95	0.07
33	579.74	0.02		85	574.76	0.11
34	579.79	0.05		86	573.90	0.10
35	582.17	0.04		87	572.85	0.11
36	583.07	0.02		88	572.64	0.05
37	583.23	0.06		89	571.26	0.10
38	585.49	0.07		90	571.14	0.07
39	590.33	0.05		91	580.13	0.08
40	587.42	0.06		92	578.05	0.05
41	587.30	0.06		93	581.60	0.05
42	596.70	0.07		94	584.00	0.07
43	596.96	0.09		95	587.14	0.14
44	600.08	0.09		96	584.52	0.14
45	601.37	0.07		97	585.92	0.15
46	598.50	0.08		98	588.66	0.08
47	598.16	0.05		99	581.36	0.05
52	578.18	0.09		100	582.67	0.08
53	576.28	0.06		101	583.70	0.06
63	592.10	0.14		102	584.95	0.07
64	595.97	0.06		103	589.00	0.12
65	593.94	0.13		104	592.11	0.07
66	597.43	0.06		105	586.49	0.07
67	595.45	0.11		106	590.65	0.12
68	598.94	0.07		107	587.78	0.09
69	599.09	0.09		108	593.90	0.05
70	602.10	0.03		109	589.19	0.08
71	589.87	0.06		142	573.42	0.06
72	591.48	0.08		143	575.31	0.05
73	592.78	0.07		144	576.96	0.03
74	593.96	0.06		145	578.57	0.10
75	595.34	0.08		163	599.40	0.00
76	599.74	0.06		6	585.92	0.00
77	596.53	0.09		7	591.70	0.00
78	597.13	0.04		1	618.13	Reservatório

APÊNDICE E – Número das tubulações do modelo.



APÊNDICE F – Características físicas das tubulações do modelo.

Tubulação	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade mm		Tubulação	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade mm
16	7	180	5.348		73	134	50	1.404
17	3	180	5.348		74	140	50	1.324
27	11	100	2.804		75	134	50	3.847
28	130	50	2.804		76	133	50	2.403
29	10	100	0.949		77	142	50	2.049
30	131	50	0.949		78	132	50	1.219
31	129	50	0.448		102	144	50	0.150
32	10	50	2.022		103	141	50	0.953
33	10	50	0.700		104	143	50	1.874
34	130	50	0.700		105	142	50	5.046
35	127	50	3.499		124	9	180	5.348
36	13	50	3.499		131	20	180	5.141
40	159	50	0.694		132	49	100	5.141
48	162	50	5.933		133	52	100	5.141
49	139	50	5.245		156	60	100	3.375
50	142	50	0.002		157	60	100	5.789
51	140	50	2.313		158	60	100	6.000
52	135	50	0.181		163	60	180	5.348
53	136	50	5.559		164	60	180	5.612
54	134	50	2.511		165	58	180	0.484
55	137	50	3.388		166	61	180	0.024
56	132	50	3.230		167	52	180	1.355
57	135	50	1.891		168	59	100	4.702
58	135	50	0.540		169	53	100	5.216
61	133	50	1.972		170	67	100	5.974
62	130	50	1.786		171	61	100	5.895
63	131	50	4.353		172	60	100	4.567
64	132	50	1.244		173	60	100	5.400
65	142	50	2.277		174	60	180	2.186
66	132	50	2.988		175	60	180	4.537
67	144	50	4.452		176	60	180	5.890
68	141	50	3.583		177	44	180	5.556
69	140	50	0.690		4	7	180	5.348
70	130	50	0.084		1	35	180	2.822
71	131	50	4.315		3	Válvula	75	---
72	136	50	0.263					

APÊNDICE G – Características físicas das concepções 1 e 2.

Concepção 1 (bombeamento para reservatório de distribuição)							
Nó	Cota m	Demanda L/s		Tubulação	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade mm
2	599.40	0		2	35	180	2.8222
4	599.40	0		6	21	180	0.0003
1	599.40	Fonte		Bomba 1	---	---	---
5	614.50	Reservatório		Válvula 3	---	75	---
				Válvula 5	---	180	---

Concepção 2 (bombeamento direto na rede)							
Nó	Cota m	Demanda L/s		Tubulação	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade mm
1	599.40	0		1	35	180	2.822
2	599.40	Fonte		Bomba 2	---	---	---

ANEXO A – Definição das informações-chave utilizadas no cálculo de indicadores de perdas (SILVA; CONEJO; MARCKA, 2004).

Volume disponibilizado (VD): soma algébrica dos volumes produzidos importados, exportado e importado, disponibilizados para distribuição no sistema de abastecimento considerado.

Volume produzido (VP): volumes efluentes da(s) ETA ou unidade(s) de tratamento simplificado no sistema de abastecimento considerado;

Volume importado (Vim): volumes de água potável, com qualidade para pronta distribuição, recebidos de outras áreas de serviço e/ou outros agentes produtores.

Volume exportado (VEx): volumes de água potável, com qualidade para pronta distribuição, transferidos para outras áreas de serviço e/ou para outros agentes distribuidores.

Volume Utilizado (VU): soma dos volumes micromedido, estimado, recuperado, operacional e especial.

Volume micromedido (Vm): volumes registrados nas ligações providas de medidores.

Volume estimado (VE): correspondente à estimativa de consumo a partir dos volumes micromedidos em áreas com as mesmas características da estimada, para as mesmas categorias de usuários.

Volume recuperado (VR): correspondente à neutralização de ligações clandestinas e fraudes.

Volume operacional (VO): volumes utilizados em testes de estanqueidade e desinfecção das redes (adutoras, subadutoras e distribuição).

Volume especial (VEs): volumes (preferencialmente medidos) destinados para corpo de bombeiros, caminhões-pipa, suprimentos sociais (favelas, chafarizes) e uso próprio nas edificações do prestador de serviços.

Volume faturado (VF): todos os volumes de água medida, presumida, estimada, contratada, mínima ou informada, faturadas pelo sistema comercial do prestador de serviços.

Número de ligações ativas (LA): providas ou não de hidrômetro, correspondem à quantidade de ligações que contribuem para o faturamento mensal.

Extensão parcial da rede (EP): extensão de adutoras, subadutoras, e redes de distribuição, não contabilizados os ramais prediais.

Extensão total da rede (ET): extensão total de adutoras, subadutoras, e redes de distribuição e ramais prediais.

Número de dias (ND): quantidade de dias correspondente aos volumes trabalhados.